

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE SOFTWARE EDUCATIVO PARA EL  
DISEÑO DE POZOS GEOTÉRMICOS DE EXPLORACIÓN,  
PRODUCCIÓN Y REINYECCIÓN ORIENTADOS A LA  
ENERGÍA GEOTÉRMICA**

PRESENTADO POR:

**CHRISTIAN NOÉ CHÁMUL GARCÍA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 2025

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA**

SECRETARIA GENERAL :

**Lic. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**MSc. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA**

SECRETARIO :

**Arq. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR:

**MSc. e Ing. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título :

**PROPUESTA DE SOFTWARE EDUCATIVO PARA EL  
DISEÑO DE POZOS GEOTÉRMICOS DE EXPLORACIÓN,  
PRODUCCIÓN Y REINYECCIÓN ORIENTADOS A LA  
ENERGÍA GEOTÉRMICA**

Presentado por :

**CHRISTIAN NOÉ CHÁMUL GARCÍA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**MSc. ALBERTO ANTONIO ROSA LUE**

San Salvador, julio de 2025

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**MSc. ALBERTO ANTONIO ROSA LUE**

Tribunal Calificador:

F. \_\_\_\_\_

**MSc. Alberto Antonio Rosa Lue**

F. \_\_\_\_\_

**MSc. Leyla Marina Jiménez Monroy**

F. \_\_\_\_\_

**Ing. Julio Cesar Moreno Fortiz**

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto y software no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de las personas que estuvieron en el camino de esta investigación.

Extiendo un agradecimiento especial a todos aquellos que contribuyeron al desarrollo de Geo-Project, desde la resolución de dudas hasta la detección y corrección de errores. Su ayuda ha sido fundamental para mejorar la calidad y funcionalidad de esta herramienta.

Quiero expresar mi agradecimiento a los testers que ayudaron a identificar errores, permitiendo que el software fuera más robusto y confiable antes de su lanzamiento.

Un reconocimiento especial para mi familia, mi madre *Delmy Elizabeth García de Chámul*, y mi padre *Noé Chámul Mejía*, y aquellos que ya no pudieron ver los resultados. Gracias a la fe que depositaron en mí y al apoyo incondicional, que fue clave para llevar este proyecto a cabo.

También agradecer a *Valeria Monserrat Alvayero Guardado*, ingeniera mecánica y mi amada compañera de vida, cuyo respaldo constante, confianza, aliento, fe y amor en mí y en este proyecto fueron esenciales para el éxito de este software, siendo mi mano derecha, la investigadora colaboradora y mentora que me acompañó en cada paso hacia la conclusión de Geo-Project. Nada de esto hubiese sido posible sin su fundamental apoyo.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento al ingeniero *Alberto Antonio Rosa Lue*, quien desempeñó un papel fundamental como coordinador, mentor y amigo, brindando su orientación y experiencia durante el proceso de desarrollo.

Un profundo agradecimiento a *Jesús Yahir Silvan Méndez*, amigo, mentor y guía, quien proporcionó su conocimiento y asesoramiento en momentos clave del desarrollo del software.

Y finalmente, y no menos importante, un agradecimiento especial a *Pablo Humberto Serrano Peña*, quien apoyó de forma ciega e incondicional al proceso de investigación y aprobación cuando se le necesitó.

Gracias a todos por su apoyo y confianza en Geo-Project. Espero que esta herramienta sea de gran utilidad para la comunidad de profesionales y estudiantes en el área de la energía geotérmica.

## Índice De Contenido

|   |        |
|---|--------|
| Índice De Tablas .....  | v      |
| Índice De Ilustraciones.....  | viii   |
| Lista De Símbolos Y Siglas.....                                     | xvii   |
| Glosario Técnico: Términos de programación .....                    | xxi    |
| Glosario Técnico: Términos de geotermia .....                       | xxii   |
| Introducción .....  | xxv    |
| Antecedentes .....  | xxvi   |
| Planteamiento Del Problema .....                                    | xxviii |
| Objetivo General .....  | xxx    |
| Objetivos Específicos.....  | xxx    |
| Alcances .....  | xxxii  |
| Limitaciones .....  | xxxiii |
| Justificaciones.....  | xxxiii |
| Capítulo 1. Marco Teórico.....                                      | 1      |
| 1.1 Fundamentos de geotermia .....                                  | 1      |
| 1.1.1 ¿Qué es la geotermia? .....                                   | 1      |
| 1.1.2 Proceso de aprovechamiento del recurso geotérmico.....        | 2      |
| 1.1.3 Automatización en el diseño de los procesos geotérmicos ..... | 3      |
| 1.1.4 Softwares existentes especializados en geotermia .....        | 4      |
| 1.2. Fundamentos de la perforación de pozos geotérmicos .....       | 6      |
| 1.2.1 Diferentes métodos de perforación de pozos geotérmicos.....   | 6      |
| 1.2.1.1 Perforación por Impacto con Martillo.....                   | 6      |
| 1.2.1.2 Perforación Seca.....                                       | 7      |
| 1.2.1.3 Perforación con Cubeta (Cable Tool Drilling) .....          | 8      |
| 1.2.2 Método de perforación rotatoria .....                         | 8      |

|   |    |
|---|----|
| 1.2.2.1 Componentes principales.....                                      | 9  |
| 1.2.2.2 Parámetros de operación críticos.....                             | 15 |
| 1.2.3 Tipos de pozos geotérmicos.....                                     | 16 |
| 1.2.3.1 Pozos de exploración.....   | 17 |
| 1.2.3.2 Pozos de producción.....  | 19 |
| 1.2.3.3 Pozos de reinyección.....   | 20 |
| 1.3 Etapas de la perforación de pozos geotérmicos.....                    | 21 |
| 1.3.1 Selección de geometría.....   | 23 |
| 1.3.2 Selección de barrenas.....  | 27 |
| 1.3.3 Diseño de sartas de perforación.....                                | 32 |
| 1.3.4 Fluidos de perforación.....   | 36 |
| 1.3.4.1 Materiales para elaboración y acondicionamiento de lodos.....     | 39 |
| 1.3.4.2 Propiedades fisicoquímicas de los lodos de perforación.....       | 40 |
| 1.3.4.3 Cálculo de volúmenes de fluido de perforación.....                | 42 |
| 1.3.5 Selección de tuberías de revestimiento.....                         | 44 |
| 1.3.5.1 Propiedades fisicoquímicas del fluido geotérmico.....             | 45 |
| 1.3.5.2 Cálculo de esfuerzos de trabajo del casing.....                   | 47 |
| 1.3.6 Cementación.....  | 52 |
| Capítulo 2. Estructuración Preliminar del Modelo de Solución.....         | 67 |
| 2.1. Enunciado Del Ejemplo Tipo.....                                      | 67 |
| 2.2. Resolución Manual del Ejemplo Tipo.....                              | 68 |
| 2.2.1. Selección Nacional.....  | 72 |
| 2.2.2. Selección Normada por el Instituto Americano de Petróleo (API).... | 74 |
| 2.2.3. Grado De Tubería De Revestimiento.....                             | 81 |
| 2.2.4. Longitud De Etapas.....  | 82 |
| 2.2.5. Cantidad De Tuberías De Revestimiento.....                         | 83 |
| 2.2.6. Fluido De Perforación.....   | 84 |
| 2.2.7. Cementación.....   | 86 |

|  |     |
|--|-----|
| Capítulo 3. Desarrollo del software educativo.....   | 92  |
| 3.1 Selección del lenguaje de programación.....  | 92  |
| 3.2 Conceptualización y diseño de la herramienta.....  | 94  |
| 3.2.1 Integración de una base de datos.....  | 94  |
| 3.2.2 Tipos y elección de bases de datos.....  | 95  |
| 3.2.3 Diagrama de flujo del funcionamiento de la aplicación.....   | 97  |
| 3.2.4 Creación de simulaciones necesarias (Gráficos e interfaz).....   | 128 |
| 3.3 Desarrollo del Software.....   | 131 |
| 3.3.1 Nombre y Estructura del Proyecto.....  | 131 |
| 3.3.2 Implementación de módulos para el cálculo.....   | 134 |
| Capítulo 4. Manual de usuario para el software.....  | 143 |
| 4.1. Uso del software.....   | 150 |
| 4.1.1 Ventana de datos de entrada.....   | 151 |
| 4.1.2 Ventana de resultados.....   | 159 |
| Capítulo 5. Presupuesto de desarrollo del software.....  | 175 |
| Durante el desarrollo del software, se incurrió en una serie de gastos necesarios para llevar a cabo las distintas etapas del desarrollo del proyecto, estos costos abarcan tanto recursos digitales y servicios, así como otros elementos indispensables para garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados para la investigación. Para su fácil comprensión y visualización, se ha realizado un desglose detallado de dichos gastos con el fin de proporcionar una visión clara y precisa de la inversión requerida, presentado en las tablas 43 y 44, donde se enumeran y describen de manera específica los distintos rubros que conforman el total de los costos asociados al desarrollo del software..... |     |
|  | 175 |
| Las tablas están divididas entre los gastos directos que se asumieron para el software que se describen en la tabla 43, siendo estos softwares y servicios para programación y gastos indirectos y otros importantes descritos en la tabla 44.....   |     |
|  | 175 |

|  |     |
|--|-----|
| Conclusiones .....                               | 178 |
| Sugerencias .....                                | 179 |
| Referencias Bibliográficas u Otras Fuentes ..... | 181 |
| Anexos .....                                     | 184 |
| Json de selección nacional .....                 | 184 |
| Código Main .....                                | 191 |

## Índice De Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Tabla de programas utilizados en procesos de generación de energía geotérmica. .... | 5  |
| Tabla 2. Diámetros de agujeros por cada etapa de perforación del pozo .....                  | 22 |
| Tabla 3. Longitud por etapa en pozos geotérmico .....  | 24 |
| Tabla 4. Diámetros de agujero para etapa estructural o inicial de pozos convencionales ..... | 24 |
| Tabla 5. Diámetros de agujero para etapa estructural o inicial de pozos exploratorios .....  | 25 |
| Tabla 6. Diferencias entre cada etapa en pozos convencionales .....                          | 25 |
| Tabla 7. Diferencias entre cada etapa en pozos exploratorios. ....                           | 26 |
| Tabla 8. Tabla resumen de las características del pozo diseñado .....                        | 26 |
| Tabla 9. Resistencia mecánica de algunos terrenos en kPa .....                               | 28 |
| Tabla 10. Resistencia mecánica de algunos terrenos en PSI .....                              | 28 |
| Tabla 11. Velocidades recomendadas para diferentes tipos de barrenas .....                   | 31 |
| Tabla 12. Tabla resumen de las características de la barrena .....                           | 31 |
| Tabla 13. Tabla de dimensiones y resistencia de la tubería de perforación .....              | 34 |
| Tabla 14. Características de tubería de perforación .....                                    | 36 |
| Tabla 15. Clasificación de fluidos de perforación.....                                       | 38 |
| Tabla 16. Materiales de tuberías y grados de acero .....                                     | 44 |
| Tabla 17. Diámetros de agujeros por cada etapa de perforación del pozo .....                 | 72 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 18. Rangos de diferencias entre cada etapa en pozos convencionales.Cantidad en pulgadas que debe reducirse el diámetro. ....  | 73 |
| Tabla 19. Diámetros seleccionados con base a valores convencionales en El Salvador.....   | 73 |
| Tabla 20. Valores calculados de WOB para cada barrena seleccionada. ....  | 74 |
| Tabla 21. Propiedades de tuberías de revestimiento con respecto a su diámetro nominal, normadas según la IADC. ....   | 75 |
| Tabla 22. Propiedades de tuberías de revestimiento con respecto a su diámetro nominal, normadas según la IADC. (continuación). ....   | 76 |
| Tabla 23. Propiedades de tuberías de revestimiento con respecto a su diámetro nominal, normadas según la IADC. (continuación).....  | 77 |
| Tabla 24. Valores seleccionados de tabla normada. Valores en pulgadas.....  | 78 |
| Tabla 25. Rangos de espesor de cementación típicamente usados en el país. Distancia entre el radio de la tubería de revestimiento y el radio del agujero perforado con barrena. Valores en pulgadas. .... | 78 |
| Tabla 26. Rango de diámetros de barrenas calculados según tabla de espesores de cementación. Valores en pulgadas. ....  | 79 |
| Tabla 27. Primera parte de Catálogo de barrenas de insertos usada para seleccionar diámetros de barrenas normadas. ....   | 79 |
| Tabla 28. Segunda parte de Catálogo de barrenas de insertos usada para seleccionar diámetros de barrenas normadas. ....   | 80 |
| Tabla 29. Selección de barrenas y tubería de revestimiento respectivas para cada etapa del pozo diseñado. Dimensiones en pulgadas. ....   | 80 |
| Tabla 30. Valores calculados de WOB para cada barrena seleccionada. ....  | 81 |
| Tabla 31. Materiales de tuberías y grados de acero .....  | 81 |
| Tabla 32. Selección de aceros para materiales de la tubería de revestimiento respectiva para cada etapa del pozo diseñado.....  | 82 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 33. Longitud por etapa en pozos geotérmico .....  | 82  |
| Tabla 34. Selección de longitudes por etapas para el pozo diseñado. ....  | 83  |
| Tabla 35. Cantidad de tuberías calculadas para el pozo diseñado.....  | 83  |
| Tabla 36. Cálculos para volumen de fluido de perforación para pozo diseñado con base a valores normados.....                            | 85  |
| Tabla 37. Cálculos para volumen de fluido de perforación para pozo diseñado con base datos nacionales. ....                             | 85  |
| Tabla 38. Cálculos para volumen de lechada para pozo diseñado con base a valores convencionales de El Salvador. ....                    | 86  |
| Tabla 39. Cálculos para volumen de lechada para pozo diseñado con base datos normados. ....   | 87  |
| Tabla 40. Valores de cálculo de balance de masas para cementación. ....   | 87  |
| Tabla 41. Resultados de balance de masa y materiales requeridos para cementación acorde a valores convencionales de El Salvador .....   | 90  |
| Tabla 42. Resultados de balance de masa y materiales requeridos para cementación acorde a valores normados. ....                        | 91  |
| Tabla 43. Primera parte de presupuesto del proceso de desarrollo de software Geo-Project y gastos incurridos en esta investigación..... | 176 |
| Tabla 44. Segunda parte de presupuesto del proceso de desarrollo de software Geo-Project y gasto incurridos en esta investigación ..... | 177 |

## Índice De Ilustraciones

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Proceso de producción de energía geotérmica .....            | 2  |
| Figura 2. Generación de energía geotérmica tradicional .....           | 3  |
| Figura 3. DTH – Down-The-Hole. ....                                    | 7  |
| Figura 4. Sarta de perforación. ....                                   | 10 |
| Figura 5. Mesa Rotatoria. ....   | 11 |
| Figura 6. Barrena de poco arrastre .....                               | 12 |
| Figura 7. Barrena de diamante policristalino (PDC).....                | 13 |
| Figura 8. Barrena de corte en Rodadura (Tricono) .....                 | 14 |
| Figura 9. Vista ejemplificada de un pozo vertical.....                 | 17 |
| Figura 10. Perfil esquemático de un pozo productor/reinyector .....    | 21 |
| Figura 11. Perfil de pozo, Etapas que lo conforman .....               | 22 |
| Figura 12. Ejemplo del esquema de un perfil de pozo diseñado .....     | 27 |
| Figura 13. Lectura y clasificación de barrenas tricono .....           | 29 |
| Figura 14. Perfil esquemático de la sarta de perforación.....          | 32 |
| Figura 15. Proceso de expulsión de fluidos .....                       | 37 |
| Figura 16. Ilustración gráfica del proceso de perforación de pozo..... | 38 |
| Figura 17. Esquema de esfuerzos axiales sobre el casing .....          | 48 |
| Figura 18. Esquema de esfuerzos radiales en el casing.....             | 49 |
| Figura 19. Esquema de esfuerzo de colapso sobre el casing.....         | 50 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 20. Esquema de proceso de cementación de pérdidas de circulación ..                    | 55  |
| Figura 21. Dimensiones de cilindro .....  | 61  |
| Figura 22. Dimensiones de un cilindro hueco .....   | 62  |
| Figura 23. Esquema del pozo geotérmico de producción del ejemplo tipo. ....                   | 69  |
| Figura 24. Diagrama de flujo de la solución a programar .....                                 | 98  |
| Figura 25. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 100 |
| Figura 26. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 101 |
| Figura 27. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 103 |
| Figura 28. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 105 |
| Figura 29. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 107 |
| Figura 30. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 108 |
| Figura 31. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 110 |
| Figura 32. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 116 |
| Figura 33. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 119 |
| Figura 34. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 121 |
| Figura 35. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 123 |
| Figura 36. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación) .....                  | 125 |
| Figura 37. Diagrama de flujo completo representado con sus letras correspondientes .....      | 127 |
| Figura 38. Boceto inicial hecho en excalidraw, como frontend prototipo de la aplicación. .... | 128 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 39. Boceto de ventana de resultados (parte 1) realizada en excalidraw, para mostrar los datos principales y figura del pozo seleccionado por el usuario .....   | 129 |
| Figura 40. Boceto de ventana de resultados (parte 2) realizada en excalidraw, para mostrar los datos de cada etapa del pozo por medio de tablas de forma ordenada..... | 130 |
| Figura 41. Carpetas dentro del código de la aplicación Geo-Project .....   | 132 |
| Figura 42. Carpetas fundamentales del desarrollo de la aplicación Geo-Project .....  | 134 |
| Figura 43. Listado de variables de entrada brindadas por el usuario para el proceso interno de cálculos dentro de la aplicación Geo-Project.....                       | 135 |
| Figura 44. Sistema de decisión de las etapas a tomar en cuenta para los cálculos dentro del programa Geo-Project.....  | 136 |
| Figura 45. Declaración de variables iniciales para el cálculo de diámetro de producción dentro del programa Geo-Project .....  | 137 |
| Figura 46. Comparación del código de la ecuación para el cálculo de volumen superficial dentro del software Geo-Project .....  | 137 |
| Figura 47. Código de los pasos para obtener el diámetro de producción, simulando la forma equivalente, dentro del software Geo-Project.....                            | 138 |
| Figura 48. Selección de diámetro por medio del método nacional dentro del software Geo-Project .....   | 139 |
| Figura 49. Proceso de adquisición de datos por medio de bases de datos json dentro del programa Geo-Project.....   | 140 |
| Figura 50. Cálculo de WOB y de fluidos de perforación en el software Geo-Project .....   | 141 |
| Figura 51. Cálculo de cementación y balance de masas dentro del software Geo-Project.....  | 142 |
| Figura 52. QR de descarga del software Geo-Project .....   | 144 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 53. Ventana inicial del asistente de instalación del programa Geo-Project.<br>.....               | 145 |
| Figura 54. Ventana del destino de alojamiento del programa Geo-Project.....                              | 146 |
| Figura 55. Ventana para empezar la instalación del programa Geo-Project...                               | 147 |
| Figura 56. Ventana de progreso de instalación del programa Geo-Project. ...                              | 148 |
| Figura 57. Ventana de finalización de instalación del programa Geo-Project.                              | 149 |
| Figura 58. Captura de Windows 11 con la búsqueda del programa Geo-Project.<br>.....                      | 150 |
| Figura 59. Ventana de carga inicial de Geo-Project.....  | 150 |
| Figura 60. Ventana para datos de entrada en Geo-Project. ....  | 151 |
| Figura 61. Ingreso del tipo de pozo en Geo-Project.....  | 152 |
| Figura 62. Ingreso del número de etapas del pozo en Geo-Project.....                                     | 152 |
| Figura 63. Ingreso del nivel de exposición dañina del pozo en Geo-Project...                             | 153 |
| Figura 64. Ingreso de la profundidad del pozo en Geo-Project.....  | 153 |
| Figura 65. Ingreso del flujo másico del pozo en Geo-Project.....   | 154 |
| Figura 66. Ingreso de la presión del fluido geotérmico en el reservorio del pozo<br>en Geo-Project.....  | 154 |
| Figura 67. Ingreso de la densidad del fluido geotérmico en el reservorio del pozo<br>en Geo-Project..... | 155 |
| Figura 68. Ingreso del coeficiente adiabático del fluido geotérmico del pozo en<br>Geo-Project.....      | 155 |
| Figura 69. Ingreso de la presión del fluido geotérmico en la superficie del pozo en<br>Geo-Project.....  | 156 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 70. Ingreso de la densidad del fluido geotérmico en la superficie del pozo en Geo-Project..... | 156 |
| Figura 71. Constante de la aceleración de la gravedad utilizada para calcular en Geo-Project.....     | 157 |
| Figura 72. Botón para aceptar el inicio del cálculo del diseño del pozo en Geo-Project.....           | 157 |
| Figura 73. Botón para reiniciar el ingreso de parámetros en Geo-Project. ....                         | 157 |
| Figura 74. Botón de ayuda en Geo-Project.....   | 157 |
| Figura 75. Tabla de ayuda al usuario del programa Geo-Project.....                                    | 158 |
| Figura 76. Captura parcial de la ventana de resultados en Geo-Project.....                            | 159 |
| Figura 77. Indicador de resultados producto del método nacional en Geo-Project. ....                  | 160 |
| Figura 78. Indicador de resultados producto del método normado en Geo-Project. ....                   | 160 |
| Figura 79. Diagrama de la ventana de resultados en Geo-Project. ....                                  | 161 |
| Figura 80. Captura de la Tabla 1 de la ventana de resultados en Geo-Project. ....                     | 162 |
| Figura 81. Captura de la Tabla 2 de la ventana de resultados en Geo-Project. ....                     | 163 |
| Figura 82. Captura de la sugerencia final de la ventana de resultados en Geo-Project.....             | 163 |
| Figura 83. Botón de ayuda en Geo-Project.....   | 164 |
| Figura 84. Tabla de notas del desarrollador del programa Geo-Project .....                            | 165 |
| Figura 85. Botón para calcular otro diseño de pozo en Geo-Project.....                                | 166 |
| Figura 86. Ventana con datos de entrada del problema tipo en Geo-Project.                             | 167 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 87. Diagrama de la resolución por el método nacional del pozo del problema tipo en Geo-Project. ....              | 168 |
| Figura 88. Captura de los resultados de la tabla 1 con el método nacional del pozo del problema tipo en Geo-Project..... | 169 |
| Figura 89. Captura de los resultados de la tabla 2 con el método nacional del pozo del problema tipo en Geo-Project..... | 170 |
| Figura 90. Diagrama de la resolución por el método normado del pozo del problema tipo en Geo-Project. ....               | 171 |
| Figura 91. Captura de los resultados de la tabla 1 con el método normado del pozo del problema tipo en Geo-Project.....  | 172 |
| Figura 92. Captura de los resultados de la tabla 2 con el método normado del pozo del problema tipo en Geo-Project.....  | 173 |
| Figura 93. Sugerencia para materiales del casing del pozo del problema tipo en Geo-Project.....                          | 174 |

## Índice De Ecuaciones

|  |    |
|--|----|
| Ecuación 1: cálculo de peso máximo sobre la barrena (WOB).....                                       | 29 |
| Ecuación 2: para el cálculo de tiempo de perforación.....  | 31 |
| Ecuación 3: cálculo del volumen del cilindro.....  | 42 |
| Ecuación 4: cálculo de volumen de fluido perforación. ....   | 43 |
| Ecuación 5: cálculo de las fuerzas axiales del propio peso de la tubería. ....                       | 48 |
| Ecuación 6: cálculo de las presiones internas del casing. ....                                       | 49 |
| Ecuación 7: cálculo de presiones internas del casing cuando $D/t < 15$ .....                         | 50 |
| Ecuación 8: cálculo de presiones internas del casing cuando $D/t > 25$ .....                         | 50 |
| Ecuación 9: longitud compensada en la tubería .....  | 51 |
| Ecuación 10: fuerza de pre-tensión .....   | 51 |
| Ecuación 11: volumen de un cilindro para cada etapa del pozo. ....                                   | 61 |
| Ecuación 12: volumen parcial del pozo.....   | 61 |
| Ecuación 13: volumen parcial anular del pozo.....  | 62 |
| Ecuación 14: cálculo del volumen de la lechada cementante .....                                      | 62 |
| Ecuación 15: análisis por volumen de la lechada. ....  | 63 |
| Ecuación 16: conservación de masa de forma general entre la superficie y el reservorio.....          | 69 |
| Ecuación 17: conservación de masa en términos de velocidad entre la superficie y el reservorio. .... | 70 |
| Ecuación 18: conservación de energía entre la superficie y el reservorio. ....                       | 70 |

|   |    |
|---|----|
| Ecuación 19: sustitución de ecuación (17) en (18). .....                  | 70 |
| Ecuación 20: sustituyendo todas las variables conocidas en (19). .....    | 71 |
| Ecuación 21: ecuación de flujo másico en el reservorio. ....              | 71 |
| Ecuación 22: ecuación del flujo másico sustituyendo ecuación (17).....    | 71 |
| Ecuación 23: ecuación de diámetro de producción despejada. ....           | 71 |
| Ecuación 24: conversión de unidades de diámetro de producción. ....       | 72 |
| Ecuación 25: cálculo de peso máximo sobre la barrena (WOB).....           | 74 |
| Ecuación 26: volumen de fluido por etapa, .....                           | 84 |
| Ecuación 27: volumen cilíndrico por cada etapa de perforación.....        | 84 |
| Ecuación 28: cálculo de volumen de pérdidas de fluido de perforación..... | 85 |
| Ecuación 29: volumen parcial anular del pozo,.....                        | 86 |
| Ecuación 30: cálculo de volumen de lechada. ....                          | 86 |
| Ecuación 31: cálculo de la densidad de la lechada.....                    | 88 |
| Ecuación 32: despeje de x en la ecuación (30).....                        | 88 |
| Ecuación 33: cálculo del volumen de lechada por saco.....                 | 88 |
| Ecuación 34: cálculo de número de sacos de cemento H a utilizar. ....     | 88 |
| Ecuación 35: cálculo de masa base.....                                    | 89 |
| Ecuación 36: número de sacos de sílica.....                               | 89 |
| Ecuación 37: número de sacos de dispersantes.....                         | 89 |
| Ecuación 38: volumen de agua para la mezcla.....                          | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| Ecuación 39: mínimo total en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas ..  | 111 |
| Ecuación 40: exceso ideal en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas..   | 112 |
| Ecuación 41: cálculo de rango adicional disponible en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas.....   | 113 |
| Ecuación 42: cálculo de exceso por cada una de las etapas del pozo para algoritmo de decisión en caso de 5 etapas .....   | 113 |
| Ecuación 43: cálculo de exceso disponible para la etapa del liner en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas.....  | 113 |
| Ecuación 44: cálculo de rango para cada una de las etapas en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas.....  | 114 |
| Ecuación 45: cálculo de rango adicional entre las 4 etapas superiores al liner en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas para un valor de “P” en el rango de 1 500 a 3 450..... | 114 |
| Ecuación 46: cálculo de exceso por cada una de las etapas del pozo para algoritmo de decisión en caso de 5 etapas para un valor de “P” dentro del rango de 1 500 a 3 450.....         | 115 |
| Ecuación 47: cálculo de exceso disponible para la etapa del liner en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas para un valor de “P” dentro del rango de 1 500 a 3 450.....         | 115 |
| Ecuación 48: distribución ideal para el exceso por cada una de las etapas del pozo para algoritmo de decisión en caso de 4 etapas. ....   | 117 |
| Ecuación 49: distribución ideal para el exceso por cada una de las etapas del pozo para algoritmo de decisión en caso de 4 etapas en el caso de superar el umbral de 950 metros. .... | 117 |
| Ecuación 50: ecuación general para el cálculo de exceso disponible para la etapa del liner para los algoritmos del programa en cualquier rango de “P”.....                            | 118 |
| Ecuación 51: cálculo de los valores de profundidad de cada una de las etapas por debajo del máximo ideal en el algoritmo del programa para pozos de 3 etapas. ....                    | 120 |

## Lista De Símbolos Y Siglas

MPa: Unidad de presión, megapascal.

kg/s: Unidad de flujo másico.

kg/m<sup>3</sup>: Unidad de la densidad.

kg: Unidad de masa, kilogramo.

s: Unidad de tiempo, segundo.

m<sup>3</sup>: Unidad de volumen, metro cúbico.

atm: Unidad de presión, atmósfera.

m: Unidad de longitud, metro.

rpm: Unidad de velocidad angular, revolución por minuto.

WOB: Peso sobre barrena por sus siglas en inglés.

$\dot{m}$ : Flujo másico.

$P_r$ : Presión del fluido geotérmico en el reservorio.

$\rho_r$ : Densidad del fluido geotérmico en el reservorio.

$P_s$ : Presión del fluido geotérmico en la superficie.

$\rho_s$ : Densidad del fluido geotérmico en la superficie.

kPa: Unidad de presión, kilopascal.

$\gamma$ : Coeficiente adiabático del vapor geotérmico.

N.R: Nivel de referencia.

$A_r$ : Área transversal del reservorio.

$v_r$ : Velocidad del fluido geotérmico en el reservorio.

$A_s$ : Área transversal de la superficie.

$v_s$ : Velocidad del fluido geotérmico en la superficie.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$z_r$ : Altura a la que se encuentra el reservorio.

$z_s$ : Altura a la que se encuentra la superficie.

Ec: ecuación.

Pa: Unidad de presión, pascal.

$D_{producción}$ : Diámetro de la etapa de producción calculado.

$\pi$ : Número pi.

pulg: Unidad de longitud, pulgada.

" : Forma alternativa de escribir pulgada.

$D_{produccion\ nacional}$ : Diámetro de la etapa de producción seleccionado con datos nacionales.

lb: Unidad de medida de peso, libra.

$\emptyset_{barrena}$ : Diámetro de la barrena.

API: Instituto Americano de Petróleo.

IADC: Asociación Internacional de Contratistas de Perforación.

ft: Unidad de medida de longitud, pies por su traducción del inglés.

lbm: Unidad de medida de masa, libra-masa.

IPS: Integradora de Perforaciones y Servicios.

mm: Unidad de medida de longitud, milímetro.

kgf: Unidad de medida de peso, kilogramo-fuerza.

PSI: Unidad de medida de presión, libra por pulgada cuadrada por su traducción en inglés.

min: Mínimo.

max: Máximo.

$V_{ap}$ : volumen del agujero perforado.

$V_{perd}$ : volumen de fluido de perforación perdido en la perforación.

$V_{tans}$ : volumen de fluido de perforación almacenado en superficie.

$D_{int}$ : Diámetro del agujero (barrena) por etapa.

$L_{etapa}$ : Longitud de etapa en metros.

Diám: Diámetro.

$V_p$ : volumen parcial anular del pozo geotérmico.

$D_{anular}$ : Diámetro externo del pozo parcial anular.

$d_{anular}$ : Diámetro interno del pozo parcial anular.

BBL: Barriles de lechada.

L: Litros.

US: Estados Unidos de América.

$V_L$ : volumen de lechada de cementación.

$\rho_{Lech}$ : Densidad de lechada.

$sac$ , sk: Saco.

ppg: Masa por unidad de volumen de un fluido de perforación, sinónimo de densidad del lodo. También conocido como lbm/gal.

t: valor de unidad de tiempo para perforación por etapas

cP: Unidad de medida de centipoises, equivalente a un milipascal segundo (mPa·s).

## **Glosario Técnico: Términos de programación**

**Arrays:** Estructura de datos que almacena una colección de elementos ordenados, generalmente del mismo tipo, accesibles mediante índices.

**Backend:** Parte oculta de una aplicación que gestiona la lógica, base de datos y procesamiento en el servidor, interactuando con el frontend para entregar datos y funcionalidades.

**Electron:** Framework para desarrollar aplicaciones de escritorio multiplataforma utilizando tecnologías web (HTML, CSS, JS) con Node.js y Chromium integrados.

**Frontend:** Parte visual y de interacción de una aplicación que el usuario experimenta directamente; incluye el diseño de la interfaz y la experiencia de usuario (UI/UX).

**Java:** Lenguaje de programación orientado a objetos, diseñado para ser robusto, portátil y ampliamente utilizado en aplicaciones empresariales y móviles.

**JavaScript (JS):** Lenguaje de programación interpretado, clave para el desarrollo web, que permite agregar interactividad y dinamismo a los sitios web.

**JSON (JavaScript Object Notation):** Formato ligero de intercambio de datos que utiliza texto plano para representar objetos estructurados de manera fácil de leer y generar.

**Python:** Lenguaje de programación de alto nivel, conocido por su sintaxis simple y legible, ampliamente utilizado en desarrollo web, inteligencia artificial, análisis de datos, y más.

React: Biblioteca de JavaScript utilizada para construir interfaces de usuario de manera eficiente, basándose en un modelo de componentes reutilizables.

Tauri: Framework para crear aplicaciones de escritorio multiplataforma utilizando tecnologías web (HTML, CSS, JS) y Rust como backend nativo.

Visual Studio Code: Editor de código fuente desarrollado por Microsoft, altamente personalizable, con soporte para múltiples lenguajes de programación y extensiones.

### **Glosario Técnico: Términos de geotermia**

Adiabático: Proceso en el cual no hay transferencia de calor con el ambiente externo durante el flujo o la extracción.

Balance de Masas: cálculo para determinar la cantidad de materiales requeridos en las operaciones del pozo, incluyendo cementación y perforación.

Barrena: Herramienta de perforación que corta el suelo y las rocas para crear el pozo.

Casing: Sinónimo de tubería de revestimiento.

Coefficiente Adiabático: Relación de capacidades caloríficas utilizada en cálculos de energía y flujo en el reservorio.

Diámetro de Agujero: Tamaño de la sección transversal del pozo perforado.

Energía Geotérmica: Forma de energía renovable obtenida del calor interno de la Tierra.

**Etapas de Anclaje:** Sección del pozo destinada a asegurar y estabilizar las estructuras internas.

**Etapas del Pozo:** Secciones o niveles en que se divide el pozo según la profundidad y el diámetro, incluyendo etapas estructurales, superficiales, intermedias y de producción.

**Exploración Geotérmica:** Proceso de investigación y estudio para identificar áreas con potencial geotérmico.

**Fluido de Perforación:** Sustancia utilizada durante la perforación para enfriar y lubricar la barrena, y para transportar los recortes de roca a la superficie.

**Fluido Dominante:** Clasificación del reservorio según el tipo de fluido predominante (agua, vapor o mezcla).

**Fluidos Geotérmicos:** Mezcla de agua y vapor extraída del subsuelo utilizada para transferir energía.

**Flujo de Masa:** Cantidad de masa de fluido que se mueve por unidad de tiempo, generalmente expresada en kilogramos por segundo (kg/s).

**Normas API:** Estándares establecidos por el American Petroleum Institute para asegurar la calidad y seguridad de los materiales y procesos utilizados en perforación.

**Perforación Convencional:** Método de perforación estándar empleado en la construcción de pozos.

**Perfil del Pozo:** Diseño geométrico y estructural del pozo que incluye etapas, profundidades y diámetros.

**Pozo Geotérmico:** Infraestructura perforada para extraer calor o fluidos del subsuelo con fines energéticos.

**Presión del Reservorio:** Fuerza ejercida por los fluidos dentro del reservorio, medida en megapascales (MPa).

**Producción Geotérmica:** Extracción de fluidos geotérmicos para la generación de energía eléctrica o térmica.

**Reinyección Geotérmica:** Proceso de devolver los fluidos extraídos al subsuelo para mantener la presión del reservorio.

**Reservorio Geotérmico:** Zona del subsuelo que contiene fluidos calientes que pueden ser utilizados para la generación de energía.

**Resistencia a la Tracción:** Capacidad de los materiales utilizados en las tuberías para soportar tensiones sin romperse.

**Sarta de Perforación:** Conjunto de herramientas y tuberías conectadas utilizadas en la perforación de pozos.

**Tubería de Revestimiento (Casing):** Estructura tubular utilizada para reforzar las paredes del pozo y proteger los fluidos durante la perforación y operación.

**Vapor Dominante:** Tipo de reservorio donde el fluido principal es vapor en lugar de líquido.

**Volumen de Lechada:** Cantidad de mezcla utilizada para cementar y reforzar las tuberías de revestimiento dentro del pozo.

**Volúmenes de Cementación:** Cantidad calculada de cemento necesaria para rellenar los espacios anulares en el pozo.

## **Introducción**

La energía geotérmica representa una fuente de energía renovable con un alto potencial, especialmente en regiones con actividad geotérmica significativa. Su aprovechamiento eficiente depende en gran medida de un diseño adecuado de los pozos geotérmicos, que son la infraestructura clave para la extracción de calor del subsuelo.

La propuesta se centra en el desarrollo de un software educativo especializado en el diseño de pozos geotérmicos dirigido a estudiantes de geotermia. El software tiene como finalidad permitir a los usuarios ingresar parámetros clave como datos de entrada y seleccionar el tipo de pozo geotérmico que desean diseñar, ya sea de exploración, producción o reinyección, junto con sus características específicas.

El programa proporcionará resultados que completen la caracterización del pozo, permitiendo a los estudiantes aprender de manera más visual e interactiva sobre el diseño de estos pozos, las diferencias entre ellos y sus necesidades, abarcando etapas cruciales como el perfil del pozo, la selección de materiales, equipos y los fluidos de perforación.

## **Antecedentes**

La aplicación del potencial geotérmico ha evolucionado significativamente con el avance de la tecnología, destacándose el uso de softwares especializados en la detección y evaluación de recursos geotérmicos. Estas herramientas han sido fundamentales para varios procesos de la exploración y diseño geotérmico, entre estos softwares se encuentran herramientas que modelan y simulan el comportamiento del subsuelo, ayudando a identificar áreas con alto potencial geotérmico.

Un ejemplo son los programas que facilitan la interpretación de datos geológicos y geofísicos, mejorando la precisión de los estudios preliminares, beneficiando la identificación de áreas con alto potencial geotérmico y reduciendo el riesgo asociado a la inversión en estos proyectos.

Además, existen otros softwares en el ámbito del manejo de tuberías en general que pueden ser utilizados en distintas aplicaciones industriales, como lo es Pipe Flow Expert, que es utilizado para el diseño de sistemas de tuberías de fluidos; CAESAR II, que analiza y simula el comportamiento de tuberías bajo diferentes condiciones de carga; Bentley AutoPIPE, conocido por su capacidad de modelado avanzado y análisis de tensión en sistemas de tuberías; y COMPASS for Flow que sirve para la calibración del flujo másico que suele usarse para la creación de un perfil preliminar del pozo.

Estos softwares también han contribuido a mejorar en algunas situaciones la eficiencia del diseño y operaciones de los sistemas relacionados con la geotermia, centrándose la mayoría en la energía geotérmica, permitiendo la planificación más precisa y ajustada de las necesidades de cada proyecto donde se han empleado, no obstante, por la investigación aún hay muchas áreas donde

hay una carencia del uso de softwares para la automatización y mayor eficiencia de distintos procesos de diseño geotérmico, y en específico, en la planificación de la perforación de los distintos tipos de pozos.

## **Planteamiento Del Problema**

El diseño de pozos geotérmicos es un paso crucial en la exploración y explotación de recursos geotérmicos, además de ser muy importante para la viabilidad económica de dicho proceso, ya que un diseño incorrecto puede resultar en la pérdida significativa de dinero y recursos, no solo eso, sino que también puede llegar a comprometer la seguridad y sostenibilidad de las operaciones del proyecto que se esté llevando a cabo para la exploración y explotación del recurso geotérmico.

A pesar de que los principios del diseño de pozos de exploración, producción y reinyección son similares, la dificultad del uso u obtención de herramientas educativas interactivas es muy alta, por lo que dificulta que la mayoría de los estudiantes de geotermia comprendan plenamente estas similitudes y diferencias en los tipos de pozos y sus diseños.

Las herramientas tradicionales suelen ser teóricas y no ofrecen un entorno de práctica suficientemente dinámico, lo que limita la capacidad de los estudiantes para aprender a aplicar conceptos de diseño en escenarios reales, una herramienta educativa interactiva virtual permitiría a los estudiantes practicar el diseño de pozos, incluso a través de procesos iterativos, lo que facilitaría una comprensión más profunda de los conceptos y procesos involucrados asegurando la calidad de sus diseños, esto no solo mejoraría su preparación académica, sino que mejoraría su preparación para futuras aplicaciones profesionales, reduciendo así el riesgo de errores costosos económicamente y mejorando la eficiencia de diseño, instalación y todos los procesos relacionados con los pozos en el ámbito de la geotermia.

Una plataforma de este tipo optimizaría los procesos de diseño y validación dentro del ámbito educativo, fomentando una mayor eficiencia tanto en el diseño como en la instalación y operación de los pozos geotérmicos en escenarios reales, lo cual es crucial en una industria donde los márgenes de error son limitados y las implicaciones económicas son sustanciales.

## **Objetivo General**

Desarrollar un software como herramienta educativa interactiva que permita a los estudiantes diseñar pozos geotérmicos de exploración, producción y reinyección para los diferentes usos de la energía geotérmica.

## **Objetivos Específicos**

Recopilar información del estado actual procedimental del diseño de los pozos geotérmicos.

Describir los datos o parámetros esenciales como datos de entrada para la propuesta de diseño de pozos.

Describir los datos o parámetros esenciales como datos de salida a obtener para la propuesta de diseño de pozos.

Implementar módulos dentro del software que calculen y proporcionen resultados precisos sobre el perfil del pozo y las características requeridas.

Desarrollar una base de datos integrada que almacene información relevante sobre los materiales y equipos utilizados en perforación y sus aplicaciones específicas en cada tipo de pozo.

Proporcionar documentación y guías didácticas (manual de usuario) que acompañen el uso del software, facilitando su integración en la currícula educativa.

Asegurar el correcto funcionamiento de la herramienta desarrollada a través de su sometimiento a diferentes pruebas iterativas.

## **Alcances**

Desarrollo de un software educativo interactivo para el diseño de pozos geotérmicos de exploración, producción y reinyección.

Validación del resultado del software y gráficos para reforzar el aprendizaje.

Integración de una base de datos con información sobre materiales y equipos utilizados en la perforación geotérmica.

Elaboración de un manual detallado para el uso adecuado de la herramienta.

El software será de uso libre y gratuito únicamente para fines educativos y de investigación para la Universidad de El Salvador.

El código fuente quedara únicamente bajo el dominio de la Universidad de El Salvador y del autor, el acceso al repositorio queda restringido a usuarios con dominio @ues.edu.sv; cualquier otro dominio no podrá acceder al código.

## **Limitaciones**

Debido al número de integrantes y a la complejidad que requeriría, el diseño se centrará solo a los pozos de tipo verticales y con perforación rotatoria, el proyecto no abarcará los pozos horizontales.

Producto de una limitante en el acceso a las instalaciones de alguna central geotérmica, el proyecto se basará con tablas teóricas y no directamente con datos propios de una central, lo cual cubre el objetivo académico buscado.

## **Justificaciones**

El software que se desarrollará estará diseñado específicamente para simular el proceso de diseño de pozos geotérmicos, permitiendo a los estudiantes interactuar con un entorno virtual en el que puedan experimentar con diferentes variables y ver en tiempo real cómo estas afectan el diseño y la viabilidad de un pozo geotérmico. Esta herramienta educativa ofrecerá a los estudiantes la posibilidad de diseñar tres tipos principales de pozos geotérmicos: pozos de exploración, pozos de producción y pozos de reinyección.

Este software no solo facilitará el aprendizaje del diseño de pozos, sino que también contribuirá a formar profesionales más capacitados, que podrán aplicar sus conocimientos de manera efectiva en la industria geotérmica, reduciendo los riesgos y costos asociados a errores de diseño. Además, al ser una herramienta educativa, podrá ser integrada fácilmente en la currícula de programas académicos, beneficiando a un amplio número de estudiantes y potenciando la enseñanza de la geotermia en instituciones educativas.

## **Capítulo 1. Marco Teórico**

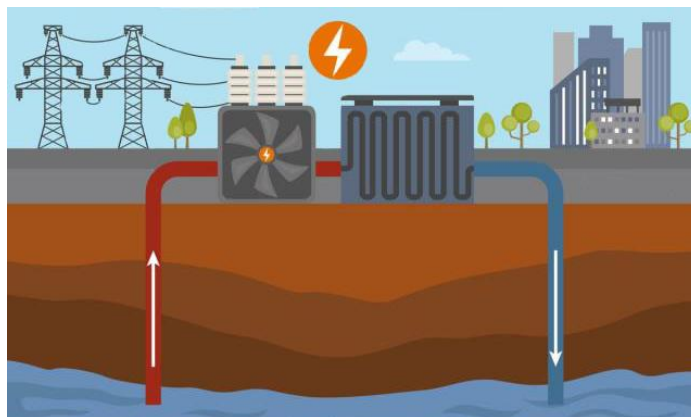
### **1.1 Fundamentos de geotermia**

El estudio de la geotermia abarca diversas disciplinas de la ingeniería y las ciencias de la Tierra, incluyendo la geología, la hidrogeología, la termodinámica y la ingeniería mecánica, entre otras. Comprender sus fundamentos permite evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de los proyectos geotérmicos, especialmente en países como El Salvador, donde esta fuente representa un recurso estratégico para la matriz energética nacional.

#### **1.1.1 ¿Qué es la geotermia?**

El término "geotermia" proviene de las palabras griegas "geo", que significa Tierra, y "thermos", que significa calor. La geotermia, por lo tanto, se refiere al calor de la Tierra y a los métodos para su aprovechamiento. Este calor se encuentra en las capas subterráneas del planeta, en diferentes profundidades y con diversas concentraciones de energía, que pueden ser aprovechadas para diferentes aplicaciones energéticas.

Este recurso puede variar en intensidad, desde las fuentes de baja temperatura, como las utilizadas para calefacción directa, hasta las de alta temperatura, que son lo suficientemente potentes como para generar electricidad a través de centrales geotérmicas como se muestra en la figura 1.



*Figura 1. Proceso de producción de energía geotérmica*

*Fuente: Aiello, M., & Doerwald, A. From Earth's depths to power grids: The rise of geothermal energy. Lark Scientific*

### **1.1.2 Proceso de aprovechamiento del recurso geotérmico**

El aprovechamiento del recurso de origen geotérmico es un proceso que involucra varias fases que van desde la exploración hasta la explotación y la reinyección de fluidos. Este proceso es esencial para la generación de energía eléctrica y para otras aplicaciones directas de la energía geotérmica, como la calefacción.

El éxito de un proyecto geotérmico depende de la evaluación precisa del recurso, el diseño adecuado del sistema de extracción y reinyección, y la implementación de tecnologías y técnicas que maximicen la eficiencia del uso del recurso a lo largo del tiempo. A continuación, se enlistan cada una de las etapas involucradas en el proceso de explotación del recurso geotérmico y se ilustran en la figura 2.

Exploración geotérmica:

- Estudios geológicos y geofísicos
- Geoquímica

- Perforación exploratoria
- Diseño de infraestructura para la exploración
- Confirmación del recurso geotérmico

Explotación del recurso geotérmico:

- Perforación de pozos de producción
- Producción de energía o calor
- Reinyección del fluido geotérmico

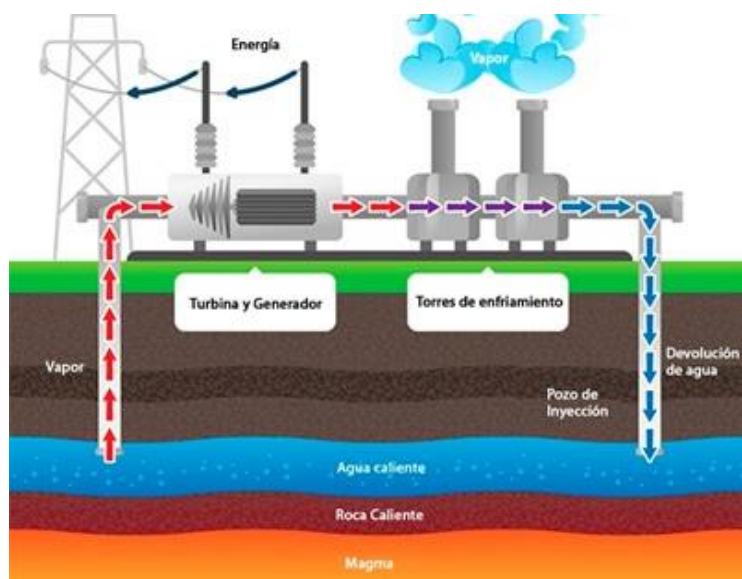


Figura 2. Generación de energía geotérmica tradicional

Fuente: Aiello, M., & Doerwald, A. *From Earth's depths to power grids: The rise of geothermal energy*. Lark Scientific

### 1.1.3 Automatización en el diseño de los procesos geotérmicos

La automatización en el diseño de pozos geotérmicos implica abordar una serie de factores técnicos clave, tales como las dimensiones del pozo, los

materiales de las tuberías, las configuraciones de las sartas de perforación y la elección de los líquidos de perforación adecuados, entre otras cosas. La tecnología puede desempeñar un papel fundamental al mejorar la precisión, seguridad y eficiencia en cada una de estas áreas, asegurando que los pozos se adapten a las condiciones geológicas específicas y optimizando el aprovechamiento del recurso geotérmico.

La definición de las dimensiones de un pozo geotérmico es una de las primeras etapas críticas en el diseño, este proceso requiere precisión para determinar el diámetro, la profundidad y la disposición de las secciones del pozo, de manera que se maximice el flujo de calor y la circulación de fluidos, automatizar este proceso, mediante el uso de un software que optimice y simule el diseño, permitirá mejorar el rendimiento a largo plazo de los pozos, garantizará la integridad del pozo y el maximizará el aprovechamiento energético.

La automatización es un proceso importante en toda industria, y los softwares son una parte importante de este proceso, en el área geotérmica hay diferentes softwares, sin embargo, al ser un área energética en auge aun no totalmente explorada, aún tiene mucho potencial y futuro crecimiento en este sentido de la automatización para la optimización de todos sus procesos, incluyendo el diseño.

#### **1.1.4 Softwares existentes especializados en geotermia**

Para la realización de este proyecto, se ha realizado la investigación de los distintos softwares que se utilizan en los diversos procesos relacionados con la generación de energía geotérmica, obteniendo los resultados de investigación mostrados en la tabla 1.

*Tabla 1. Tabla de programas utilizados en procesos de generación de energía geotérmica.*

| <b>Nombre del Software</b> | <b>Descripción</b>  | <b>Utilidad principal en geotermia</b>   |
|----------------------------|---|--|
| Pipe Flow Expert           | Herramienta para diseño y análisis de sistemas de tuberías de fluidos.                    | Optimiza el flujo y transporte de fluidos en redes de tuberías geotérmicas.              |
| Bentley AutoPIPE           | Modelado avanzado y análisis de tensión en sistemas de tuberías.                          | Facilita el diseño seguro de conducciones en plantas geotérmicas.                        |
| Leapfrog Geothermal        | Software de modelado geológico 3D dinámico, basado en datos de perforación y geofísicos.  | Construye representaciones precisas de yacimientos para maximizar la explotación.        |
| GEOVisionary               | Plataforma de modelización y visualización geoespacial en 3D.                             | Permite optimizar la ubicación de pozos y comprender características del terreno.        |
| Petrel                     | Entorno de simulación de subsuelo para yacimientos (flujo de fluidos, geomecánica, etc.). | Realiza simulaciones detalladas de yacimientos geotérmicos para optimizar la extracción. |
| ECLIPSE                    | Motor de simulación avanzada de yacimientos adaptado a geotermia.                         | Simula dinámicas de reservorios para planificar a largo plazo la explotación.            |
| Thermoflow                 | Plataforma para diseño y optimización de ciclos térmicos (Rankine y otros procesos).      | Optimiza el ciclo de generación eléctrica a partir del calor geotérmico.                 |

Aunque existen múltiples herramientas que aportan en aspectos específicos de proyectos geotérmicos, como el análisis de tuberías, la simulación de reservorios o la modelización 3D, ninguna de ellas está enfocada de manera directa al diseño detallado de pozos geotérmicos y mucho menos al aspectos educativos, esto crea la necesidad de desarrollar un software especializado que reúna y automatice los procesos críticos del diseño de pozos: desde la selección de diámetros adecuados de tuberías, longitud de las tuberías, fluidos de perforación, y por consiguiente la generación de material didáctico para formar a futuros ingenieros especializados en el diseño de pozos geotérmicos.

## **1.2. Fundamentos de la perforación de pozos geotérmicos**

Este proceso requiere una planificación que considere no solo el tipo de pozo a perforar, sino también factores geológicos, técnicos y ambientales. La correcta elección del tipo de pozo, su ubicación estratégica, y los métodos y equipos de perforación son esenciales para optimizar la producción de energía, minimizar los costos y reducir el impacto ambiental.

Los fundamentos del diseño de estos pozos no solo permiten una extracción segura y eficiente, sino que también garantizan la viabilidad económica y operativa del recurso geotérmico a largo plazo.

### **1.2.1 Diferentes métodos de perforación de pozos geotérmicos.**

La perforación de pozos geotérmicos es una etapa crítica en el aprovechamiento de la energía geotérmica, ya que permite acceder a reservorios de alta temperatura y presión en el subsuelo, la selección del método de perforación depende de múltiples factores, entre los que destacan la geología local, la profundidad del pozo, las propiedades térmicas y la presencia de fluidos en la formación, cada técnica presenta ventajas y limitaciones que deben evaluarse para optimizar la productividad y la seguridad de la perforación.

#### ***1.2.1.1 Perforación por Impacto con Martillo***

La perforación por impacto, o percutora (figura 3), se basa en la acción repetitiva de golpes de martillo para fracturar la roca, este método puede combinarse con una acción rotatoria (perforación rotatorio-percutiva) para mejorar la eficiencia en condiciones de rocas muy duras y abrasivas, el martillo de fondo (DTH – Down-The-Hole): Es uno de los equipos más comunes en este método, ya que dirige los impactos directamente en la punta de la broca, generando una fractura localizada y eficiente en la roca.

Este método resulta especialmente útil en formaciones de alta resistencia y en terrenos donde la perforación rotatoria convencional puede ser lenta o ineficiente, siendo que la acción percutora mejora la tasa de penetración en rocas duras, reduciendo el tiempo de perforación en ciertas condiciones.

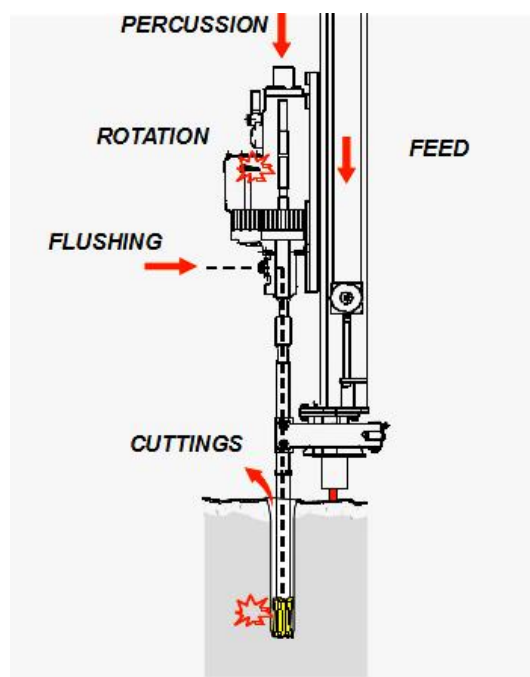


Figura 3. DTH – Down-The-Hole.

Fuente: Difference between DTH (Down the Hole) Drilling and Top Hammer Drilling

### 1.2.1.2 Perforación Seca

La perforación seca se caracteriza por la ausencia o mínima utilización de fluidos de perforación, en este método, la remoción de recortes se lleva a cabo mediante aire comprimido o por simples mecanismos de extracción pasiva.

Este método tiene aplicaciones en entornos específicos, como, por ejemplo, puede utilizarse en áreas donde el manejo de fluidos es complicado o cuando se requiere evitar la contaminación del reservorio geotérmico, lo que podría afectar

la calidad del fluido térmico extraído, este método destaca por esta ventaja de tener menor riesgo de contaminación química y control simplificado en ciertos escenarios, no obstante tiene la limitación de poseer mayor riesgo de sobrecalentamiento de la broca, también una menor eficiencia en la remoción de recortes y desafíos en el control de la estabilidad del pozo, especialmente en perforaciones profundas o en formaciones muy fracturadas.

### ***1.2.1.3 Perforación con Cubeta (Cable Tool Drilling)***

La perforación con cubeta, también conocida como perforación por cable, es un método tradicional que se basa en la repetida caída de una herramienta de percusión (la “cubeta” o martillo) que rompe la roca por impactos sucesivos, los fragmentos se remueven, ya sea por el flujo de aire o mediante acción gravitacional, permitiendo progresar lentamente en la formación, este proceso requiere equipos relativamente simples y es especialmente adecuado para pozos de menor profundidad o en formaciones blandas, además, en ciertos escenarios, puede ser una opción económicamente viable para perforaciones exploratorias o de menor escala en proyectos geotérmicos.

### **1.2.2 Método de perforación rotatoria**

La perforación rotatoria es el método de perforación más utilizado en la industria de extracción de recursos, tanto en hidrocarburos como en energía geotérmica. Este método permite perforar a grandes profundidades y es altamente versátil, ya que puede adaptarse a una amplia gama de condiciones geológicas.

El principio básico de la perforación rotatoria consiste en la transmisión de un movimiento de rotación desde la superficie hasta el fondo del pozo, donde una

broca de perforación (también conocida como barrena) tritura o corta las formaciones rocosas. La broca se conecta a la sarta de perforación, que está compuesta por múltiples segmentos de tuberías de perforación conectadas entre sí, durante este proceso se inyecta un fluido de perforación (generalmente lodo) que cumple múltiples funciones:

- Enfriamiento y lubricación: Protege la broca y reduce el desgaste en condiciones de alta temperatura.
- Transporte de recortes: El lodo arrastra los fragmentos de roca hacia la superficie, permitiendo mantener la estabilidad del pozo.
- Control de presión: Ayuda a evitar la entrada de fluidos o gases del reservorio.

Este método tiene las ventajas de que permite alcanzar grandes profundidades con alta eficiencia, es adaptable a diferentes tipos de formaciones geológicas, desde sedimentos blandos hasta rocas compactas, y es esencial en pozos de alta temperatura, donde el control térmico mediante fluidos es crítico.

#### **1.2.2.1 Componentes principales**

Sarta de Perforación (Drill String): La sarta de perforación es la columna vertebral del sistema de perforación rotatoria. Su composición se ilustra en la figura 4 y se describe a continuación:

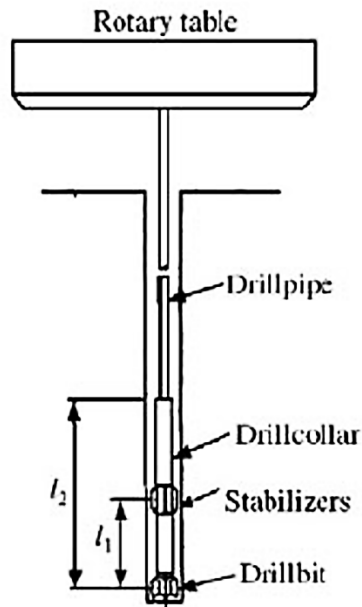


Figura 4. Sarta de perforación.

Fuente: Ghasemloonia, A., Rideout, G., & Butt, S. (s.f.). *The effect of weight on bit on the contact behavior of drillstring and wellbore*

- Tuberías de perforación (Drill Pipe): Estas tuberías huecas se conectan entre sí y permiten la transmisión de los fluidos de perforación desde la superficie hasta la broca. Además, transmiten el movimiento rotacional desde la mesa rotatoria o el top drive hasta la broca. Estas tuberías son altamente resistentes para soportar las fuerzas de compresión y torsión que ocurren durante la perforación.
- Collares de perforación (Drill Collars): Son tuberías más pesadas que se colocan cerca de la broca para proporcionar el peso necesario (WOB) que ayuda a la broca a penetrar las formaciones geológicas. Los collares de perforación actúan como contrapeso para evitar que las tuberías de perforación sufran fatiga excesiva durante la operación.

- Herramientas estabilizadoras (Stabilizers): Son dispositivos que se colocan en la sarta de perforación para mantener la broca centrada en el pozo. Los estabilizadores ayudan a reducir la vibración y el desgaste irregular de la broca, mejorando la eficiencia de la perforación.

Mesa Rotatoria o Top Drive: Se ilustra en la figura 5 y se describe a continuación:

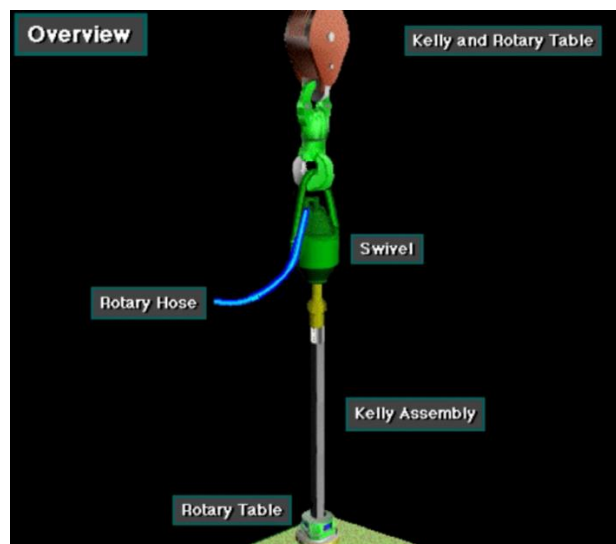


Figura 5. Mesa Rotatoria.

Fuente: Engineers Got Talent. (2017, abril 15).  
#11 Rotating Equipment, Mast and Substructure.

- Mesa Rotatoria: Tradicionalmente, la mesa rotatoria es el equipo que proporciona la rotación a la sarta de perforación. Está montada en la plataforma de perforación y gira la sarta de perforación a través de una conexión llamada Kelly. La mesa rotatoria permite la rotación continua de la sarta, lo que resulta en la penetración de la broca en el subsuelo.
- Top Drive: En equipos más modernos, el top drive ha reemplazado a la mesa rotatoria. El top drive es un motor de alta potencia que está

montado directamente sobre la sarta de perforación y proporciona rotación directamente sin necesidad de utilizar la Kelly. El top drive es más eficiente porque permite perforar más rápido y permite conexiones de tuberías sin detener la operación.

- Broca de Perforación (Drill Bit): La broca es la herramienta que efectivamente realiza el corte o trituración de la roca. Algunos tipos de barrenas de perforación son: De poco arrastre, de diamante policristalino (PCD) y de corte en rodadura (Rolling cutter bit o tricono).
- Barrena de poco arrastre

Las barrenas de poco arrastre (figura 6) son ideales para perforar formaciones blandas o medianamente consolidadas, donde la resistencia de la roca es baja y se busca una alta tasa de penetración (ROP). Estas barrenas están diseñadas para ofrecer mínima resistencia al corte, lo que les permite avanzar rápidamente a través de sedimentos o rocas no consolidadas. Su diseño minimiza el torque y la energía requerida para rotar la sarta de perforación, lo que reduce el desgaste en los equipos.



*Figura 6. Barrena de poco arrastre*

*Fuente: ETW International. (s. f.). Barrenas de arrastre escalonadas, brocas de perforación con insertos de carburo y roscado*

- Barrena de diamante policristalino (pdc)

Las barrenas PDC (figura 7) son una innovación que utilizan cortadores de diamante policristalino para perforar formaciones duras y abrasivas con una alta durabilidad. El diamante policristalino, al ser una de las sustancias más duras, permite que estas barrenas perforen sin perder su capacidad de corte rápidamente, lo que las hace muy eficaces en pozos profundos donde el desgaste es un problema.



*Figura 7. Barrena de diamante policristalino (PDC)*

*Fuente: Sheenstone. (s. f.). Product Default.*

- Barrena de corte en rodadura (tricono)

Las barrenas de corte en rodadura o barrenas tricónicas (figura 8) son muy versátiles y se utilizan en una amplia gama de formaciones intermedias a duras. Estas barrenas están equipadas con tres conos giratorios que llevan dientes de acero endurecido o insertos de carburo de tungsteno, dependiendo de la dureza de la formación. Los conos giran de manera independiente y trituran la roca a medida que avanzan.



*Figura 8. Barrena de corte en Rodadura (Tricono)*

*Fuente: El Dorado Sistemas de Sinergia. (s. f.).  
Brocas de triconos..*

Fluidos de Perforación (Drilling Fluids): Los fluidos de perforación, o lodos, son fundamentales en el proceso de perforación rotatoria. Tienen varias funciones clave:

- **Enfriamiento de la broca:** La fricción generada entre la broca y la formación genera mucho calor, por lo que el fluido ayuda a disipar ese calor y evitar que la broca se sobrecaliente.
- **Transporte de recortes:** El fluido de perforación se bombea a través de la sarta de perforación, sale por la broca y sube por el espacio anular (entre la sarta y las paredes del pozo), arrastrando los recortes de roca hacia la superficie.
- **Estabilización del pozo:** Los fluidos de perforación también ejercen presión sobre las paredes del pozo, ayudando a prevenir derrumbes o colapsos.

- En los pozos geotérmicos, los fluidos deben estar formulados para soportar las altas temperaturas sin descomponerse. Se suelen usar lodos a base de agua con aditivos como bentonita y polímeros.

### **1.2.2.2 Parámetros de operación críticos**

**Peso Sobre la Broca (WOB):** El WOB es el peso que se aplica a la broca para facilitar la penetración en la formación rocosa. Este peso es proporcionado por los collares de perforación y debe ser cuidadosamente monitoreado para evitar dañar la broca o la sarta. Un WOB insuficiente puede reducir la tasa de penetración, mientras que un WOB excesivo puede dañar la broca o la sarta, e incluso producir fallos en el pozo.

**Velocidad de Rotación (RPM):** La velocidad de rotación es otro parámetro clave que debe ser ajustado según el tipo de formación. En formaciones blandas, se pueden utilizar velocidades de rotación más altas, mientras que, en formaciones duras, típicas de los campos geotérmicos, se utilizan velocidades más bajas para evitar el desgaste prematuro de la broca. En condiciones geotérmicas, donde las formaciones tienden a ser más duras, una RPM más baja es crucial para proteger la integridad de las herramientas.

**Tasa de Penetración (ROP):** La tasa de penetración es la velocidad a la que el pozo avanza. La ROP depende de varios factores, incluidos el WOB, la RPM, la dureza de la formación, y las propiedades del fluido de perforación. La optimización de la ROP es esencial para equilibrar el avance rápido del pozo con la durabilidad de la broca y los costos operativos.

**Presión y Flujo de los Fluidos:** El caudal de los fluidos de perforación y su presión son fundamentales para garantizar que los recortes de perforación sean

retirados eficazmente del pozo. Si los fluidos no tienen el caudal o la presión adecuados, los recortes pueden acumularse y obstruir el pozo, lo que ralentiza la perforación o causa problemas de estabilidad.

### **1.2.3 Tipos de pozos geotérmicos**

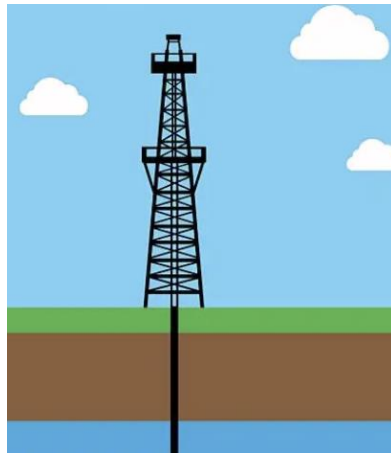
El diseño de los pozos geotérmicos es fundamental para garantizar la eficiencia en la extracción de los recursos geotérmicos, así como la exploración y la reinyección, dependiendo de la naturaleza del reservorio, las características geológicas y los objetivos de la planta, se emplean distintos tipos de pozos, para la aplicación es fundamental comprender sobre todo los pozos verticales, los cuales son su punto objetivo.

Los pozos verticales (figura 9) son los más simples y comunes en la perforación geotérmica. Se perforan directamente hacia abajo desde la superficie, penetrando verticalmente a través de las capas de la tierra hasta alcanzar el reservorio geotérmico, estos tipos de pozos poseen diferentes ventajas, y también desventajas, pero entre las ventajas tenemos:

- **Simple de perforar:** La perforación de pozos verticales es técnicamente más sencilla y rápida en comparación con otros tipos de pozos, lo que disminuye los costos iniciales de construcción.
- **Facilidad en el monitoreo:** La instalación de equipos de monitoreo y la evaluación del comportamiento del pozo es más directa en pozos verticales.
- **Mayor vida útil:** Al tener una trayectoria recta y sin desviaciones, estos pozos tienden a sufrir menos desgaste por la fricción o los esfuerzos mecánicos durante la operación.

Mientras que por el lado de las desventajas cabe mencionar:

- Limitación en la cobertura del reservorio: Los pozos verticales solo permiten acceder a una porción del reservorio. Si el área de explotación es grande o dispersa, se necesitarían más pozos para cubrir la zona.
- Menor flexibilidad: Son menos adaptables a condiciones geológicas complejas, donde los reservorios pueden encontrarse a diferentes profundidades o direcciones.



*Figura 9. Vista ejemplificada de un pozo vertical.*

*Fuente: iStock by Getty Images. (s. f.). Fracking [vector].*

En los proyectos geotérmicos, la perforación se lleva a cabo con diferentes objetivos, lo que da lugar a tres tipos principales de pozos: pozos de exploración, pozos de producción y pozos de reinyección, cada uno de estos cumple una función específica dentro del ciclo de aprovechamiento de energía geotérmica.

### **1.2.3.1 Pozos de exploración**

Los pozos de exploración son los primeros que se perforan en un proyecto geotérmico y su principal objetivo es evaluar la viabilidad de la fuente de energía

geotérmico, estos pozos se perforan en las etapas iniciales del proyecto para recolectar información sobre la temperatura, presión, permeabilidad y características del reservorio, tienen como objetivo más definido el determinar la existencia de recursos geotérmicos explotables, los pozos de exploración permiten identificar la calidad y cantidad del recurso térmico, así como la capacidad del reservorio para sostener una planta geotérmica.

Los pozos de exploración suelen ser de menor profundidad que los pozos de explotación, ya que el objetivo es identificar las zonas más prometedoras del reservorio, mientras que, para la perforación de pozos de exploración, se suele emplear la perforación rotatoria convencional con lodo o aire comprimido, dependiendo de la geología.

En esta fase, la precisión y la obtención de datos de alta calidad son más importantes que la velocidad de perforación ya que el análisis de los datos recolectados en estos pozos es fundamental para decidir si el proyecto puede avanzar a las fases de desarrollo y explotación, la caracterización de la roca, la temperatura y la química de los fluidos determinarán la viabilidad técnica y económica del proyecto.

Generalmente, son pozos con profundidades inferiores a 1 000 m. Aunque se perforan pozos con esta tecnología a profundidades de hasta los 1 500 m con fines de reconocimiento litológico y termodinámico (T-P), mediante la recuperación de núcleo continuo. Los usos Principales son: fundaciones en la construcción, usos directos de energía y exploración geotérmica.

Ventajas de los pozos exploratorios:

- Menores costos de Perforación (30-50% costo por pozo), es 50% menos costo que el pozo productor.
- Plataformas y canes pequeñas, menor impacto ambiental.
- Poco tiempo para efectuarse, en 3 meses se puede tener construido un pozo exploratorio.
- Uso de menor cantidad de productos / agua. De hecho, se puede utilizar el agua de las plantas de reinyección.
- Se usan después como pozos de monitoreo.
- Se pueden obtener testigos continuos.

Desventajas de los pozos exploratorios:

- Baja capacidad de flujo en estos pozos (10-15 kg/s). Estos no pueden ser ocupados como productores porque los productores tienen >20 kg/s, por lo que solo pueden usarse para monitoreo.
- Posibilidad de problemas frecuentes de perforación.
- El espacio entre casing y pozo es muy pequeño, dificultades de circulación, limpieza y cementación.
- Los tubos utilizados son muy cortos y de pared muy delgada, lo que no permite disponer de peso suficiente para romper la roca.

### **1.2.3.2 Pozos de producción**

Los pozos de producción, también llamados pozos de explotación son perforados para extraer los fluidos geotérmicos del subsuelo hacia la superficie,

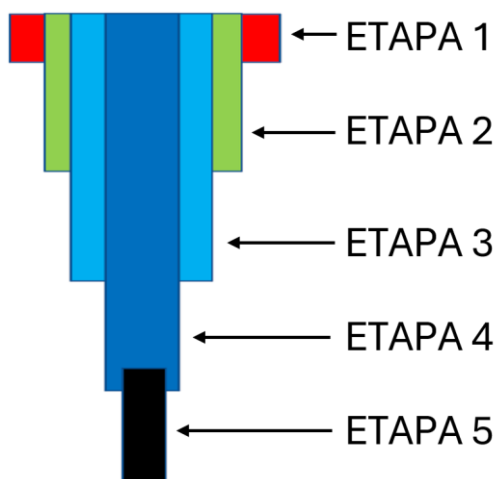
donde el calor será aprovechado para generar electricidad o para otros usos industriales y domésticos, estos pozos son esenciales para la operación continua de una planta geotérmica, su objetivo específico es capturar fluidos geotérmicos (vapor o agua caliente) desde el reservorio hacia la superficie para su aprovechamiento en una planta generadora, estos pozos suelen ser los más profundos, ya que deben llegar hasta las zonas del reservorio donde las temperaturas y presiones son lo suficientemente altas para generar energía, las profundidades pueden variar desde unos cientos de metros hasta más de 3 000 metros.

### ***1.2.3.3 Pozos de reinyección***

Los pozos de reinyección son una parte esencial del ciclo geotérmico, ya que permiten devolver al reservorio los fluidos extraídos y enfriados tras el aprovechamiento del calor, este proceso es crítico para mantener la presión dentro del reservorio y evitar su agotamiento prematuro, la profundidad de los pozos de reinyección suele ser similar a la de los pozos de explotación, ya que deben estar ubicados en zonas donde el fluido reinyectado pueda ayudar a mantener la presión en el reservorio, no obstante, en algunos casos, pueden ser más superficiales si la reinyección es a capas menos profundas del sistema geotérmico.

Los pozos de reinyección están ubicados a una distancia suficientemente distanciados de los pozos de explotación para evitar la reinyección directa de fluido frío en la zona productiva, lo que podría reducir la eficiencia térmica del sistema. Además, el diseño del pozo debe garantizar que el fluido reinyectado se disperse de manera eficiente en el reservorio.

A estos tipos de pozos junto con los de producción se les denomina como “convencionales”. Ambos requieren 4 o 5 etapas, por lo que presentan la característica de ser más grandes en longitudes y diámetros que los pozos exploratorios. Su distribución en perfil se observa en la figura 10.



*Figura 10. Perfil esquemático de un pozo productor/reinyector*

### 1.3 Etapas de la perforación de pozos geotérmicos

El diseño de un pozo geotérmico es un proceso que involucra diversas etapas que buscan garantizar la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto. El diseño debe considerar factores geológicos, térmicos y mecánicos para asegurar que el pozo pueda extraer el recurso geotérmico de manera segura y eficiente.

El diseño de los pozos geotérmicos en el país se compone de cuatro a cinco etapas, cada una caracterizada por diferentes diámetros (tabla 2) tanto en los agujeros como en las tuberías de revestimiento, esta configuración sigue una estructura telescópica, es decir, los diámetros disminuyen progresivamente en cada etapa.

Tabla 2. Diámetros de agujeros por cada etapa de perforación del pozo

| Etapa | Diámetro de agujero (pulg) | Diámetro de tubería (pulg) | Función            |
|-------|----------------------------|----------------------------|--------------------|
| 1     | 40                         | 36                         | Estructural        |
| 2     | 32 – 26                    | 24 ½ – 20                  | Superficial        |
| 3     | 23 – 17 ½                  | 18 ⅝ – 13 ⅜                | Intermedia         |
| 4     | 17 ½ – 12 ¼                | 13 ⅜ – 9 ⅝                 | Anclaje/Producción |
| 5     | 12 ¼ – 8 ½                 | 9 ⅝ – 7 ⅝ o 7              | Liner              |

Existen dos tipos principales de diseño de pozos, esto según su función, los pozos de exploración y los destinados a producción o reinyección, para alcanzar el diseño final deseado, es importante definir previamente los elementos que determinarán las características del pozo, entre estos, se encuentran las etapas específicas del pozo en función de los diámetros de los agujeros y las tuberías que se utilizarán.

En la figura 11 se ilustra las etapas que pueden tener los pozos geotérmicos, habiendo pozos que omiten la etapa intermedia.

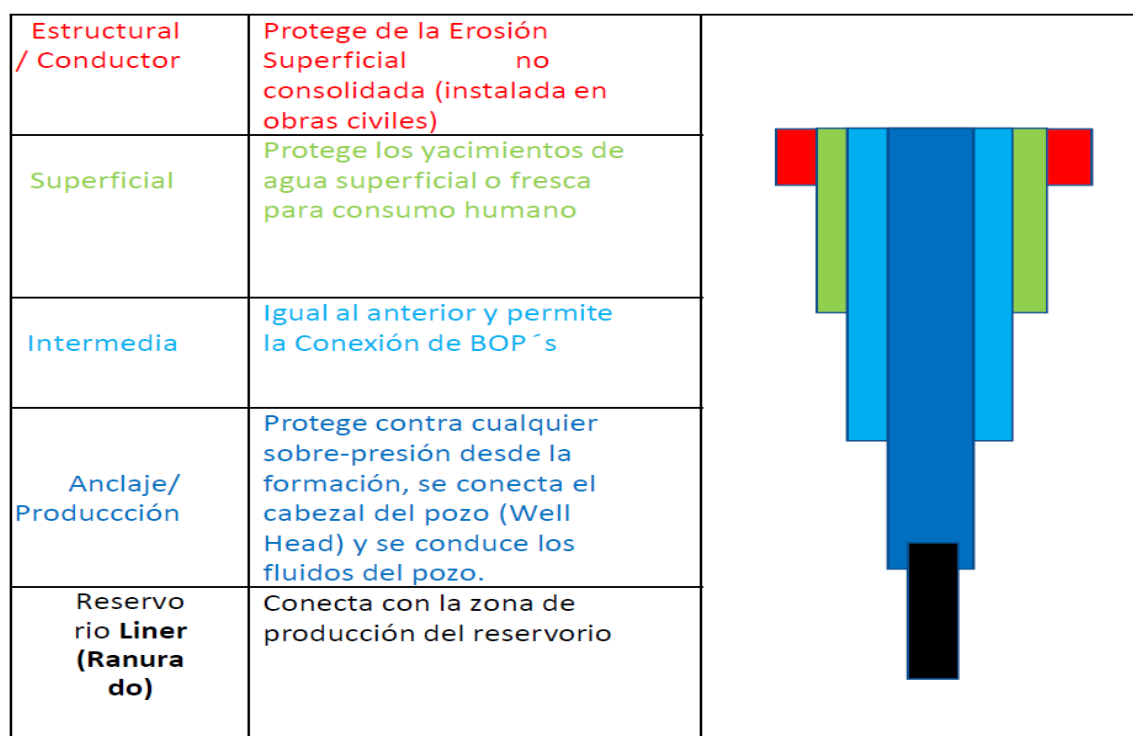


Figura 11. Perfil de pozo, Etapas que lo conforman

Etapa estructural: Esta es la fase más vulnerable a la erosión provocada por las lluvias, ya que constituye la primera capa del pozo, por ello, se diseña con el mayor diámetro posible, asegurando una protección adecuada.

Etapa superficial: Su función principal es evitar la mezcla de flujos cruzados entre fluidos geotérmicos, garantizando la separación y aislamiento de los mismos.

Etapa intermedia: Al igual que la etapa superficial protege los yacimientos de agua superficial, además, en ella se instala el preventor de reventones BOP.

Etapa de anclaje: Es la última etapa cementada del pozo y tiene como propósito sostener el liner, esta fase asegura que el liner quede correctamente posicionado y estable dentro del pozo.

Liner: Esta es la parte del pozo que está en contacto directo con el reservorio geotérmico, el liner incorpora perforaciones en la tubería para permitir el flujo de los fluidos desde el reservorio hacia la superficie, esta etapa no se cementa porque esto provocaría un efecto negativo en la permeabilidad del reservorio, disminuyendo su eficiencia.

### **1.3.1 Selección de geometría**

La geometría del pozo incluye decisiones sobre el diámetro y la longitud de las tuberías de perforación y revestimiento, así como la configuración del pozo en relación con el reservorio geotérmico. La construcción de un pozo geotérmico se efectúa de forma telescópica, en nuestro país se construyen en cuatro o cinco etapas con diferentes diámetros de agujero y tubería de revestimiento. Los pasos a seguir para diseñar el perfil de un pozo geotérmico son las siguientes:

Paso 1. Se establecen las etapas a perforar y la respectiva longitud de las mismas según la profundidad total del pozo (indicada por los estudios geocientíficos). Pueden ser de 3 etapas, 4 etapas o 5 etapas. La longitud de cada etapa se selecciona también con base al tipo de pozo a perforar.

Los valores típicos de longitud por etapa de perforación están enlistados en la tabla 3 siguiente.

*Tabla 3. Longitud por etapa en pozos geotérmico*

| Etapa       |    | Longitud por etapa (m) | Consideraciones adicionales  |
|-------------|----|------------------------|--|
| Estructural | 1° | 100 a 150              |  |
| Superficial | 2° | 500 a 650              |  |
| Intermedia  | 3° | 450 a 800 o 1000       | El límite máximo para esta etapa es por lo general para pozos de 4 etapas. |
| Producción  | 4° | 700 a 900              | El límite máximo para esta etapa es por lo general para pozos de 4 etapas. |
| Liner       | 5° | ≥ 800                  | Hasta completar la profundidad del pozo.                                   |

Paso 2. Se indica el diámetro de agujero con el que se iniciará la perforación y el diámetro final con el que se terminará la última etapa. (donde se colocará la tubería ranurada). Los valores típicos de estos están descritos en la tabla 4 para pozos convencionales y en la tabla 5 para pozos exploratorios.

*Tabla 4. Diámetros de agujero para etapa estructural o inicial de pozos convencionales*

| Pozo convencional                  |                  |
|------------------------------------|------------------|
| Diámetro inicial de agujero (pulg) | 17 ½, 26, 32, 40 |
| Diámetro final de agujero (pulg)   | 6 ¼, 8 ½ a 12 ¼  |

*Tabla 5. Diámetros de agujero para etapa estructural o inicial de pozos exploratorios*

| <b>Pozo exploratorio</b>           |            |
|------------------------------------|------------|
| Diámetro inicial de agujero (pulg) | 8 ½ a 14 ¾ |
| Diámetro final de agujero (pulg)   | 2 ¾ a 3 ¾  |

Paso 3. En cada etapa se reducirá el diámetro del pozo según la relación:

$$\Delta D = \text{Diámetro de agujero}_i - \text{Diámetro de agujero}_f$$

Resultando en la tabla 6 y 7 siguientes para pozos convencionales y exploratorios respectivamente.

*Tabla 6. Diferencias entre cada etapa en pozos convencionales*

| <b>Etapa</b> | <b><math>\Delta D</math>: Cantidad en pulgadas que debe reducirse el diámetro (pozo convencional)</b> |
|--------------|---|
| 1°           |   |
| 2°           | 6   |
| 3°           | 4 ⅛   |
| 4°           | 2 ⅝   |
| 5°           | 1 ¾   |

*Tabla 7. Diferencias entre cada etapa en pozos exploratorios.*

| <b>Etapa</b> | <b><math>\Delta D</math>: Cantidad en pulgadas que debe reducirse el diámetro (pozo exploratorio)</b> |
|--------------|---|
| 1°           |   |
| 2°           | 1 ½   |
| 3°           | <sup>5</sup> / <sub>16</sub>  |
| 4°           | ---   |
| 5°           | ---   |

Según la tabla 6, entre el diámetro de la 1° etapa y la 2° etapa deben haber 6 pulg de diferencia. Mientras que entre la 4° y la 5° no debe haber ninguna diferencia.

Paso 4. Concluidos estos cálculos se tendrá en resumen la tabla 8 con las características del pozo.

*Tabla 8. Tabla resumen de las características del pozo diseñado*

| <b>Etapa</b> | <b>Diámetro de agujero</b> | <b>Diámetro de tubería</b> | <b>Profundidad (m)</b> | <b>Características de tuberías</b> |                    | <b>Tipo de junta</b> |
|--------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------------|--------------------|----------------------|
|              |                            |                            |                        | <b>Peso lineal</b>                 | <b>Grado acero</b> |                      |
|              |                            |                            |                        |                                    |                    |                      |

Al final del diseño del perfil del pozo los resultados esperados serán tener un esquema como el de la figura 12.

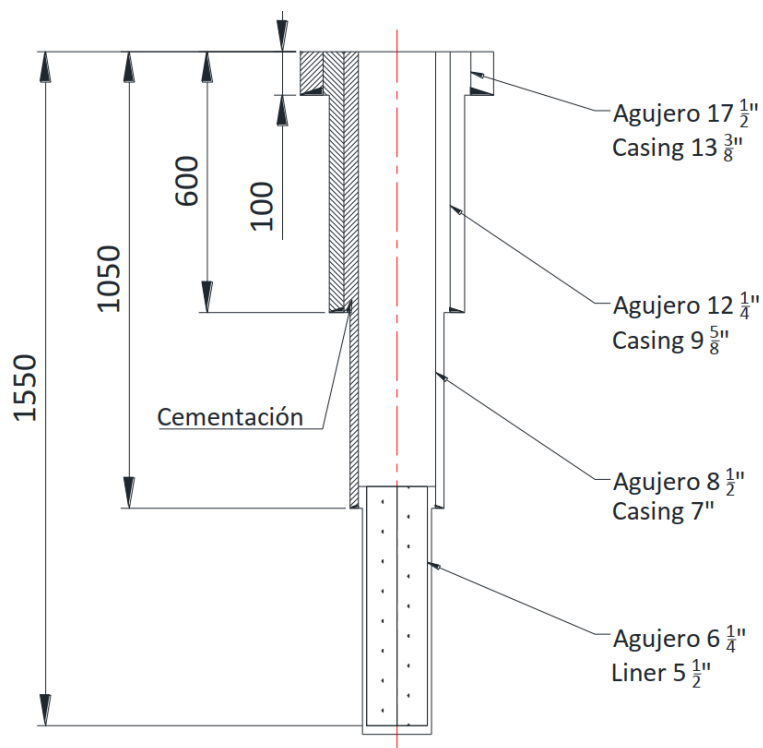


Figura 12. Ejemplo del esquema de un perfil de pozo diseñado

Fuente: Parada, L. F. A., Cajas Maldonado, C., Orellana Mejía, M. J., & Taco Tenelanda, E. (2015). *Propuestas de diseño para la perforación de pozos exploratorios (Tesis de diplomado)*. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Unidad de Postgrados.

### 1.3.2 Selección de barrenas

Definido el perfil del pozo, se continúa con la selección de las barrenas a emplearse durante la perforación.

Las barrenas con el uso se desgastan y pueden reemplazarse, por lo tanto, se indicará las cantidades que se mantienen en reserva.

Los diámetros de las barrenas se seleccionan con base a los diámetros del agujero de cada etapa a perforar. Es así como el diámetro de la barrena será el mismo del agujero.

El tipo de barrena se selecciona según la estratigrafía del subsuelo, es decir, con base en el material que se va a perforar.

Las propiedades mecánicas de algunos materiales que componen las capas de la tierra, se indican en las tablas 9 y 10:

*Tabla 9. Resistencia mecánica de algunos terrenos en kPa*

| <b>Terrenos</b>                        | <b>Material</b>               | <b>Resistencia (kPa)</b> |
|--|-------------------------------|--------------------------|
| Terrenos buenos y resistentes (piedra) | Tosca                         | 588.4                    |
|  | Arcillas compactas y secas    | 294.2                    |
|  | Grava, arena compacta y secas | 392.3                    |
|  | Greda compacta y seca         | 294.2                    |
| Terrenos medianos<br>Terrenos húmedos  | Arena (de aluvión)            | 98.1                     |
|  | Arcillas flojas               | 98.1 a 147.1             |
| Terrenos malos y compresibles Tierra   | Tierra de relleno             | 39.2                     |
|  | Arena de médanos (dunas)      | 49.0                     |

*Tabla 10. Resistencia mecánica de algunos terrenos en PSI*

| <b>UCS (PSI)</b> | <b>FORMACIÓN</b>         |
|------------------|--------------------------|
| Menos de 6 000   | BLANDA Y BLANDA PEGAJOSA |
| 6 000 a 11 000   | MEDIANAMENTE BLANDA      |
| 11 000 a 14 000  | MEDIA                    |
| 14 000 a 18 000  | MEDIANAMENTE DURA        |
| 18 000 a 24 000  | DURA                     |
| Más de 24 000    | EXTREMADAMENTE DURA      |

Para cualquier tipo de barrena que se utilice, es importante determinar el peso máximo sobre la barrera que puede soportar, mediante la ecuación (1):

Ecuación 1: cálculo de peso máximo sobre la barrena (WOB)

$$WOB = 4400 \text{ lb} * \phi Bit \quad (1)$$

Donde  $\phi Bit$  es el diámetro de barrena y está en pulgadas.

Las barrenas tricónicas (Figura 13) presentan una clasificación de la IADC (International Association of Drilling Contractors). Este sistema utiliza un código de cuatro dígitos que describe el tipo de diente, la dureza de la formación que puede perforar, el tipo de cojinete, y características especiales adicionales.

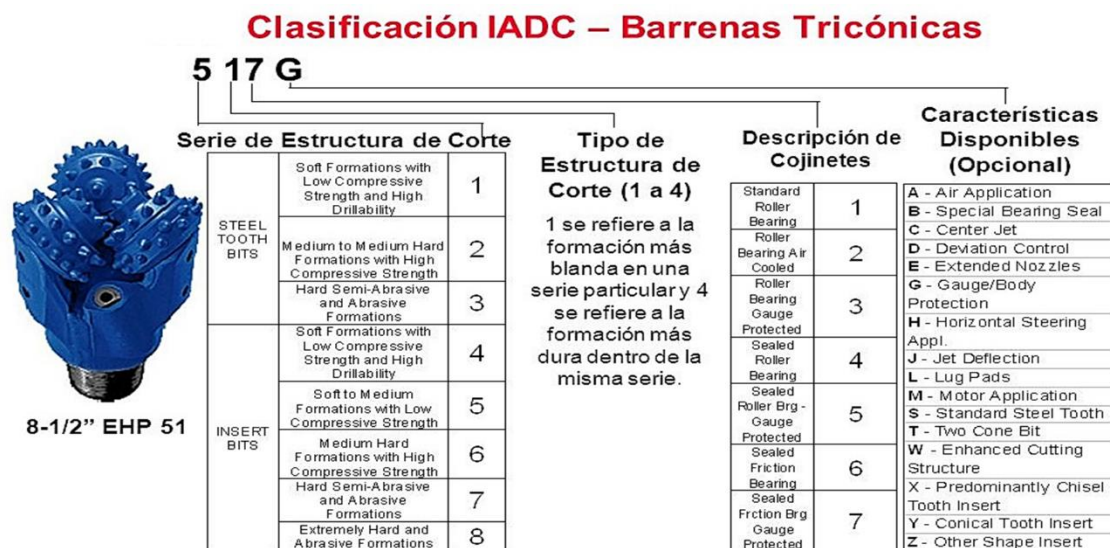


Figura 13. Lectura y clasificación de barrenas tricono

Fuente: SPE 23937 El sistema de clasificación de barrenas de rodillos de la IADC

El primer dígito del código va de 1 a 8 y describe el tipo de diente de la barrena tricónica. Este dígito se refiere a si la barrena está diseñada con dientes cortantes

integrados en el cuerpo o con dientes postizos, y también indica para qué tipo de formaciones geológicas se recomienda la barrena.

El segundo dígito, que va del 1 al 4, indica tanto el número de dientes en los conos de la barrena como la dureza de la formación que puede perforar. El número de dientes está relacionado directamente con el tamaño de la formación geológica que la barrena puede manejar. Cuanto más alto es el número, mayor es el número de dientes, lo que significa que la barrena está diseñada para perforar formaciones más duras.

El tercer dígito, que va del 1 al 7, describe el tipo de cojinete que utiliza la barrena. Los cojinetes son una parte crucial del diseño de la barrena, ya que permiten que los conos giren de manera eficiente durante la perforación.

El cuarto dígito del código, representado por una letra (A-Z), describe características especiales o modificaciones que tiene la barrena. Estas características pueden incluir adaptaciones para entornos específicos o para mejorar el rendimiento en ciertas condiciones.

Para la presente investigación, ya que el tipo de suelo en el país es similar en la mayoría de los casos y que históricamente la barrena tricónica es la más utilizada, con fines educativos solamente se toma en cuenta para el software este tipo de barrenas, colocándola como barrena por defecto para simplificación de diseño y con fines educativos.

La velocidad de las barrenas se selecciona por cada etapa, por estrato y por tipo de barrena misma, sus valores se describen en la tabla 11.

Tabla 11. Velocidades recomendadas para diferentes tipos de barrenas

| Tipo de barrena               | Velocidad recomendada (m/h) | Observaciones                             |
|-------------------------------|-----------------------------|---|
| a) De poco arrastre           | 1 a 4                       |   |
| b) De diamante policristalino | 8 a 10 o mayores            | Dependiendo de la formación del subsuelo. |
| c) Tricónica                  | 5 a 10                      | Dependiendo de la formación del subsuelo. |

Una vez que se tenga la velocidad de avance de la barrena y la longitud de la etapa, se puede estimar el tiempo.

se obtiene entonces con los datos de longitud de la etapa y la velocidad de corte asignada, mediante:

Ecuación 2: para el cálculo de tiempo de perforación.

$$T = \frac{L}{v} \quad (2)$$

Donde:

T: Tiempo de perforación por etapa (*h*)

L: Longitud de la etapa (*m*)

V: Velocidad (*m/h*)

Con los datos de tiempo de uso se completa la información de la tabla 12.

Tabla 12. Tabla resumen de las características de la barrena

| Barrena | Tiempo de duración [horas] | Velocidad de avance [m/h] | Observaciones |
|---------|----------------------------|---------------------------|---------------|
|         |                            |                           |               |

### 1.3.3 Diseño de sartas de perforación

Posterior a la selección de barrenas, debe seleccionarse la sarta de perforación a utilizar (tuberías de perforación, collar de perforación, tubería de peso pesado, etc.) con base al requerimiento de la etapa (estratigrafía, longitud, diámetros, etc.).

En la estructura de la sarta de perforación existen tres tramos como se observa en la figura 14. Se tiene un tramo expuesto a tensión, el cual está formado por las tuberías que quedan más cerca de la superficie. Asimismo, hay una sección bajo compresión, el cual es el tramo que está más profundo en el pozo. Sin embargo, también existe un punto llamado punto neutro, donde la sarta está recibiendo tensión y compresión a la vez. Puesto que este es un punto crítico, el lastrabarrena debe ser quien soporta este esfuerzo.

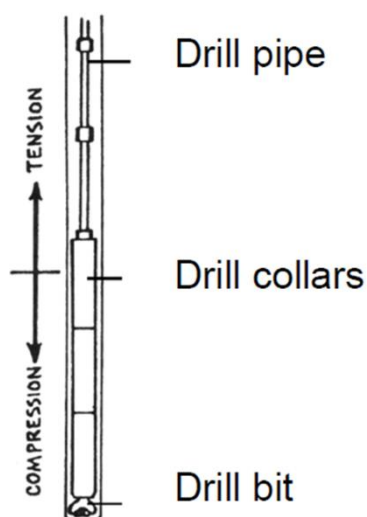


Figura 14. Perfil esquemático de la sarta de perforación

Fuente: *Drilling Manual*. (2024, 19 de febrero). *Drill string components guide in oil & gas*.

El diseño adecuado de la sarta de perforación requiere encontrar un equilibrio entre el peso y la flexibilidad. Los collares de perforación o lastrabarrenas se colocan cerca de la broca para proporcionar el peso necesario para romper las rocas, mientras que las tuberías de perforación agregan longitud al pozo. Además, los estabilizadores se colocan en puntos clave de la sarta para centrarla en el pozo y evitar que golpee o dañe las paredes del agujero.

La selección de los materiales para la sarta de perforación es crítica. Las tuberías de perforación suelen estar fabricadas de acero de alta resistencia con aleaciones que les permiten soportar la tensión y la compresión que se experimentan durante la perforación. La tabla 13 contiene especificaciones técnicas de tuberías de perforación sin costura con refuerzo interno (Internal Upset Drillpipe), basadas en estándares API (American Petroleum Institute).

Tabla 13. Tabla de dimensiones y resistencia de la tubería de perforación

| Size of Outer Diameter (in.) | Weight per Foot With Coupling (lbf) | Internal Diameter (in.) | Internal Diameter Full Upset (in.) | Collapse Pressure* |         |           |               | Internal Yield Pressure* |         |           |             | Tensile Strength* |               |                 |                     |
|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------|---------|-----------|---------------|--------------------------|---------|-----------|-------------|-------------------|---------------|-----------------|---------------------|
|                              |                                     |                         |                                    | D (psi)            | E (psi) | G** (psi) | S-135** (psi) | D (psi)                  | E (psi) | G** (psi) | S-135 (psi) | D 1,000 (lbf)     | E 1,000 (lbf) | G** 1,000 (lbf) | S-135** 1,000 (lbf) |
| 2 3/8                        | 4.85                                | 1 995                   | 1 437                              | 6 850*             | 11 040  | 13 250    | 16 560        | 7 110*                   | 10 500  | 14 700    | 18 900      | 70                | 98            | 137             | 176                 |
| 2 3/8                        | 6.65                                | 1 815                   | 1 125                              | 11 440             | 15 600  | 18 720    | 23 400        | 11 350                   | 15 470  | 21 660    | 27 850      | 101               | 138           | 194             | 249                 |
| 2 7/8                        | 6.85                                | 2 441                   | 1 875                              | —                  | 10 470  | 12 560    | 15 700        | —                        | 9 910   | 13 870    | 17 830      | —                 | 136           | 190             | 245                 |
| 2 7/8                        | 10.4                                | 2 151                   | 1 187                              | 12 110             | 16 510  | 19 810    | 24 760        | 12 120                   | 16 530  | 23 140    | 29 750      | 157               | 214           | 300             | 386                 |
| 3 1/2                        | 9.5                                 | 2 992                   | 2 250                              | —                  | 10 040  | 12 110    | 15 140        | —                        | 9 520   | 13 340    | 17 140      | —                 | 194           | 272             | 350                 |
| 3 1/2                        | 13.3                                | 2 764                   | 1 875                              | 10 350             | 14 110  | 16 940    | 21 170        | 10 120                   | 13 800  | 19 320    | 24 840      | 199               | 272           | 380             | 489                 |
| 3 1/2                        | 15.5                                | 2 602                   | 1 750                              | 12 300             | 16 770  | 20 130    | 25 160        | 12 350                   | 16 840  | 23 570    | 30 310      | 237               | 323           | 452             | 581                 |
| 4                            | 11.85                               | 3 476                   | 2 937                              | —                  | 8 410   | 10 310    | 12 820        | —                        | 8 600   | 12 040    | 15 470      | —                 | 231           | 323             | 415                 |
| 4 1/2                        | 13.75                               | 3 958                   | 3 156                              | —                  | 7 200   | 8 920     | 10 910        | —                        | 7 900   | 11 070    | 14 230      | —                 | 270           | 378             | 486                 |
| 5                            | 16.25                               | 4 408                   | 3 750                              | —                  | 6 970   | 8 640     | 10 550        | —                        | 7 770   | 10 880    | 13 980      | —                 | 328           | 459             | 591                 |
| 5 1/2                        | 21.9                                | 4 778                   | 3 812                              | 6 610              | 8 440   | 10 350    | 12 870        | 6 320                    | 8 610   | 12 060    | 15 500      | 321               | 437           | 612             | 787                 |
| 5 1/2                        | 24.7                                | 4 670                   | 3 500                              | 7 670              | 10 460  | 12 560    | 15 700        | 7 260                    | 9 900   | 13 860    | 17 820      | 365               | 497           | 696             | 895                 |
| 6 3/8                        | 25.2                                | 5 965                   | 5 000                              | 4 010              | 4 810   | 6 160     | 6 430         | 4 790                    | 6 540   | 9 150     | 11 770      | 359               | 489           | 685             | 881                 |

Size of Outer Diameter (Diámetro Externo): Muestra el diámetro externo nominal de la tubería, una medida crítica para la selección de herramientas y accesorios de perforación.

Weight per Foot With Coupling (Peso por Pie con Acoplamiento): Indica el peso de la tubería por pie, incluyendo el acoplamiento (coupling), que es el elemento de unión entre tramos de tubería.

Internal Diameter (Diámetro Interno): Indica el diámetro interno de la tubería, tanto para el cuerpo de la tubería como en la parte con refuerzo interno (full upset). Un diámetro interno mayor facilita el flujo de fluido de perforación.

Collapse Pressure (Presión de Colapso): Esta columna muestra la presión máxima a la que la tubería puede resistir el colapso bajo presión externa, dependiendo del grado del material. D, E, G, y S-135 son grados de acero con diferentes resistencias.

Internal Yield Pressure (Presión de Fluencia Interna): La presión interna máxima que puede soportar la tubería antes de deformarse plásticamente (fluencia). Esto depende de la resistencia del material y el grosor de la tubería.

Tensile Strength (Resistencia a la Tensión): La capacidad de la tubería para resistir la tensión axial (carga de tracción) sin romperse. Esta es una de las propiedades más críticas, ya que la tubería debe soportar su propio peso y el de la columna de perforación.

Asimismo, existen otros tipos de tuberías de perforación, las cuales se pueden visualizar en la tabla 14.

Tabla 14. Características de tubería de perforación

| Size: Outside<br>Nominal Diameter |       | Plain-end |        |       | Wall      |       | Upset Ends, For Weld-<br>on Tool Joints |                                |
|-----------------------------------|-------|-----------|--------|-------|-----------|-------|---|--------------------------------|
|                                   |       | Weight    | Weight | Grade | Thickness |       |   |                                |
| in                                | mm    | lb/ft     | lb/ft  | kg/m  |           | in    | mm                                      |                                |
| 2 3/8                             | 60.3  | 6.7       | 6.26   | 9.32  | E X, G, S | 0.280 | 7.11                                    | Ext. Upset                     |
| 2 7/8                             | 73.0  | 10.4      | 9.72   | 14.48 | E X, G, S | 0.362 | 9.19                                    | Int. Upset / Ext. Upset        |
| 3 1/2                             | 88.9  | 9.5       | 8.81   | 13.12 | E         | 0.254 | 6.45                                    | Int. Upset /Ext. Upset         |
| 3 1/2                             | 88.9  | 13.3      | 12.31  | 18.34 | E X, G, S | 0.368 | 9.35                                    | Int. Upset /Ext. Upset         |
| 3 1/2                             | 88.9  | 15.5      | 14.63  | 21.79 | E         | 0.449 | 11.40                                   | Ext. Upset /Int.-Ext.<br>Upset |
| 3 1/2                             | 88.9  | 15.5      | 14.63  | 21.79 | X, G, S   | 0.449 | 11.40                                   | Ext. Upset /Int.-Ext.<br>Upset |
| 4                                 | 101.6 | 14.0      | 12.93  | 19.26 | E X, G, S | 0.330 | 8.38                                    | Ext. Upset                     |
| 4 1/2                             | 114.3 | 13.8      | 12.24  | 18.23 | E         | 0.271 | 6.88                                    | Int. Upset /Ext. Upset         |
| 4 1/2                             | 114.3 | 16.6      | 14.98  | 22.31 | E X, G, S | 0.337 | 8.56                                    | Ext. Upset/Int.-Ext.<br>Upset  |
| 4 1/2                             | 114.3 | 20.0      | 18.69  | 27.84 | E X, G, S | 0.430 | 10.92                                   | Ext. Upset/Int.-Ext.<br>Upset  |
| 5                                 | 127.0 | 16.3      | 14.87  | 22.15 | X, G, S   | 0.296 | 7.52                                    | Int. Upset                     |
| 5                                 | 127.0 | 19.5      | 17.93  | 26.71 | E         | 0.362 | 9.19                                    | Int.-Ext. Upset                |
| 5                                 | 127.0 | 19.5      | 17.93  | 26.71 | X, G, S   | 0.362 | 9.19                                    | Int.-Ext. Upset                |
| 5                                 | 127.0 | 25.6      | 24.03  | 35.79 | E         | 0.500 | 12.70                                   | Int.-Ext. Upset                |
| 5                                 | 127.0 | 25.6      | 24.03  | 35.79 | X, G, S   | 0.500 | 12.70                                   | Ext. Upset                     |
| 5 1/2                             | 139.7 | 21.9      | 19.54  | 29.51 | E X, G, S | 0.361 | 9.17                                    | Int.-Ext. Upset                |
| 5 1/2                             | 139.7 | 24.7      | 22.54  | 33.57 | E X, G, S | 0.415 | 10.54                                   | Int.-Ext. Upset                |
| 6 3/8                             | 168.3 | 25.2      | 22.19  | 33.05 | E         | 0.330 | 8.38                                    | Int.-Ext. Upset                |

### 1.3.4 Fluidos de perforación

El lodo de perforación (Figura 15) es un componente clave en la perforación de pozos geotérmicos. Este fluido cumple múltiples funciones, incluyendo la refrigeración de la broca de perforación, el transporte de recortes a la superficie y el mantenimiento de la estabilidad del pozo. Dependiendo de la etapa de perforación, se utilizan diferentes tipos de lodo, por lo general, son una combinación a base de agua y una arcilla como la bentonita, quien es la que le

da precisamente la apariencia de lodo, de ahí que se conozca también como lodos de perforación.



*Figura 15. Proceso de expulsión de fluidos*

*Fuente: Inicio de perforación con rotación con lodo,  
Ing Peter.*

El comportamiento del lodo de perforación es crucial para el éxito de la operación. En movimiento, el lodo se comporta como un fluido no newtoniano o tixotrópico, lo que significa que su viscosidad cambia en función de la velocidad de flujo. Esto permite que el lodo transporte de manera eficiente los recortes de perforación a la superficie, mientras que, en reposo, el lodo actúa como un material semisólido que evita que las paredes del pozo colapsen, a este revoque en las paredes se le conoce como Cake o Enjarre, como el ilustrado en la figura 16.

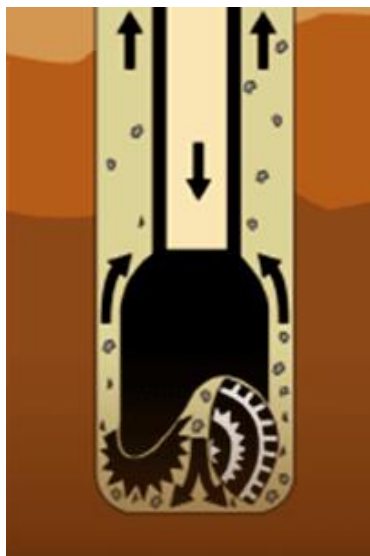


Figura 16. Ilustración gráfica del proceso de perforación de pozo

Fuente: Rigzone. (s. f.). Rigzone training insight How Do Drilling Fluids Work?

La bentonita pura se aplica en las primeras fases y a medida las etapas sean más profundas se les agrega aditivos químicos para controlar su viscosidad. Un lodo demasiado viscoso puede obstruir el flujo, mientras que un lodo muy delgado puede ser incapaz de transportar los recortes. En situaciones donde el lodo comienza a perder su eficacia, se pueden agregar agentes viscosificantes o adelgazantes para restaurar el equilibrio. Estos se ven descritos en la tabla 15.

Tabla 15. Clasificación de fluidos de perforación

| Clasificación          | Componentes                            | Fase continua   |
|------------------------|--|-----------------|
| Lodo base-agua         | Sólidos activos, inertes y agua        | Agua            |
| Lodo base-hidrocarburo | Sólidos activos, inertes, aceite, agua | Aceite (Diesel) |
| Polvoriento            | Solo aire                              | Aire            |
| Agua brumosa           | Aire, agente espumante, agua           | Aire            |
| Lodo aireado           | Aire, lodo                             | Lodo            |
| Espuma rígida          | Aire, agente espumante, viscosificante | Fluido espumoso |
| Agua                   | Solo agua                              | Agua            |

Se ocupa aire como fluido cuando ya se está cerca del reservorio. Si el lodo aumenta su viscosidad y densidad cuando llevan recortes incluidos, el ingeniero de lodos agrega adelgazantes o si se ha disminuido agrega viscosificantes.

#### **1.3.4.1 Materiales para elaboración y acondicionamiento de lodos**

Viscosificantes / Suspendedores:

- Bentonita
- CMC (Carboximetil Celulosa de Sodio)
- PHPA (Poliacril Amida Parcialmente Hidrolizada)

Defloculantes / Adelgazadores / Dispersantes:

- Lignitos (carbón mineral pulverizado)
- Lignosulfonatos de Sodio
- Polímeros Sintéticos: Estabilizan el lodo a altas temperaturas

Encapsulantes De Arcillas Reactivas Naturales

- PHPA (Poliacril Amida Parcialmente Hidrolizada)

Controladores De pH:

- Soda Cáustica: Mantener un "pH" entre 9.0-10.0. El rendimiento de los productos de los lodos es en un ambiente alcalino. Proteger la sarta de perforación contra la corrosión.

Precipitantes Del Ion Calcio:

- Carbonato de Sodio (Soda Ash): Seco
- Bicarbonato de Sodio: Húmedo

#### Inhibidores De Corrosión

- Nitrito de Sodio
- Carbonato de Zinc
- Oxido de Zinc

#### Lubricantes/Surfactantes

- Aceites: Minerales / Vegetales
- Fosfato de Sodio
- Polímeros Sintéticos
- Pirofosfato Ácido de Sodio (diluyente)

#### Secuestrantes De Oxígeno

- Bisulfito de Amonio
- Bisulfito de Sodio
- Metabisulfito de Sodio

#### **1.3.4.2 Propiedades fisicoquímicas de los lodos de perforación**

- Densidad (gr/ml): Densidad de lodos de perforación 6.5-11.8 lb/gal o promedio 9 lb/gal, si hay aumento se agrega agentes diluyentes.
- Viscosidad Marsh (Viscosidad de embudo segundos/L): Debe ser 4 veces la densidad en lb/gal, o sea si tenemos 9 lb/gal, Marsh sería (36 s)/(¼ gal)
- Viscosidad Plástica, centipoises (cP): Mide la resistencia interna al flujo de los sólidos suspendidos en el lodo cuando este es sometido a un esfuerzo

cortante. Importante para evaluar la eficiencia en la suspensión de sólidos durante la perforación.

- Punto de Cedencia (lb/100 pie<sup>2</sup>): Es la fuerza que debe aplicarse para poner en movimiento un fluido que ha estado en reposo. Sirve para evitar que los recortes de perforación se asienten en el fondo del pozo cuando el fluido no está en movimiento.
- Arena (%v/v): Mide el contenido de arena en el lodo. Una alta concentración puede causar desgaste excesivo en los equipos de perforación y aumentar la posibilidad de obstrucciones en el pozo.
- Sólidos Totales (%v/v): Incluyen todas las partículas sólidas suspendidas en el lodo de perforación, puede afectar las propiedades reológicas del lodo y su capacidad de transporte.
- Agua (%v/v): Es importante monitorear este valor, ya que el equilibrio entre agua y sólidos determina la viscosidad y la capacidad de enfriamiento del fluido.
- pH: Es crucial para mantener la estabilidad química del lodo y evitar la corrosión de los equipos.
- Calcio y Dureza Total (ppm): Altos niveles de calcio pueden precipitar ciertos aditivos y causar problemas en la fluidez del lodo.
- Prueba de Azul de Metileno (kg arcilla/m<sup>3</sup> lodo): Esta prueba es importante para evaluar la cantidad de arcillas expansivas, que pueden afectar la estabilidad del pozo y el comportamiento del lodo en presencia de formaciones arcillosas.

- Cloruros y Sal en forma de Cloruro de Sodio (ppm): Un alto contenido de sal puede afectar la densidad y la viscosidad del lodo, así como su interacción con las formaciones.

### **1.3.4.3 Cálculo de volúmenes de fluido de perforación**

Deben calcularse los volúmenes de fluido que se requerirán durante la perforación de cada etapa. Tomando como base la geometría de las tuberías de cada etapa (cilíndricos), es decir:

- Volumen del agujero perforado: Se refiere a pérdidas normales y por derrumbes. Por lo general, el rango normal que se pierde es de 1.5 m<sup>3</sup> de lodo por cada metro cúbico perforado.

Ecuación 3: cálculo del volumen del cilindro

$$v_{ap} = (5.07 \times 10^{-4}) * D_{int}^2 * L \quad (3)$$

Donde:

$v_{ap}$ : volumen en m<sup>3</sup> del cilindro formado por etapa

$D_{int}$ : Diámetro en pulgadas del agujero (barrena) por etapa

$L$ : Longitud de etapa en metros

La ecuación 3 tiene mezcla de unidades<sup>1</sup> debido a que el valor de  $(5.07 \times 10^{-4})$  conlleva la conversión de dichas unidades al sistema internacional de metros cúbicos.

---

<sup>1</sup> Esta mezcla de unidades se presenta varias veces durante el documento debido a que varias de las ecuaciones ya poseen las conversiones de forma interna, este es el resultado de la combinación de unidades presentes en el mercado de diversos productos utilizados en el diseño

- Volumen de pérdidas de lodos: La que se produce por la permeabilidad de las paredes del agujero. Un indicativo de pérdidas de fluidos es la reducción en el volumen en superficie, (en parte por zonas de alta permeabilidad), por tanto, deben considerarse éstas para mantener constante la cantidad de lodo en todo momento. Estas pérdidas se solucionan taponeando la sección que es permeable.
- Volumen de almacenamiento en superficie: Debe considerarse que el volumen y cantidad de tanques que se tengan disponibles en superficie tiene capacidades que varían de acuerdo al uso (comúnmente tres tanques de 30 m<sup>3</sup> c/u). Estos son almacenados por cualquier suceso que se presente y sean requeridos. Conocidas las concentraciones y los volúmenes requeridos, con simple matemática se puede estimar las cantidades de cada producto requerido para la fabricación de lodo. Las cantidades finales dependerán de las presentaciones en que se comercialice cada producto.

El volumen total estimado por etapa es la suma de estos tres volúmenes (considerando la reserva de tanques en superficie).

Ecuación 4: cálculo de volumen de fluido perforación.

$$\text{Volumen de fluido por etapa} = V_{ap} + V_{perd} + V_{tans} \quad (4)$$

Donde todos los términos están en metros cúbicos y corresponden a:

$V_{ap}$  es el volumen del agujero perforado.

$V_{perd}$  es el volumen de pérdidas de lodos.

$V_{tans}$  es el volumen de almacenamiento en la superficie.

### 1.3.5 Selección de tuberías de revestimiento

Las tuberías de revestimiento, también conocidas como casing, se colocan dentro del pozo para proteger las paredes del agujero y para aislar diferentes zonas geológicas, evitando la mezcla de fluidos y la contaminación del pozo.

El tipo de tubería de revestimiento, el peso lineal y el grado de acero, son valores comunes empleados en geotermia y se seleccionan según las condiciones del terreno y la etapa que corresponde.

En la tabla 16 se muestran enlistados materiales para tuberías de revestimiento con diferentes grados normados por el Instituto Americano de Petróleo API.

*Tabla 16. Materiales de tuberías y grados de acero*

| API Grade | Yield Stress, psi (Minimum) | Yield Stress, psi (Maximum) | Minimum Ult. Tensile, psi | Minimum Elongation (%) |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|
| H-40      | 40 000                      | 80 000                      | 60 000                    | 29.5                   |
| J-55      | 55 000                      | 80 000                      | 75 000                    | 24.0                   |
| K-55      | 55 000                      | 80 000                      | 95 000                    | 19.5                   |
| N-80      | 80 000                      | 110 000                     | 100 000                   | 18.5                   |
| L-80      | 80 000                      | 95 000                      | 95 000                    | 19.5                   |
| C-90      | 90 000                      | 105 000                     | 100 000                   | 18.0                   |
| C-95      | 95 000                      | 110 000                     | 105 000                   | 18.5                   |
| T-95      | 95 000                      | 110 000                     | 105 000                   | 18.0                   |
| P-110     | 110 000                     | 140 000                     | 125 000                   | 15.0                   |
| Q-125     | 125 000                     | 150 000                     | 135 000                   | 18.0                   |

Los aceros del H-40, J-55 y K-55 son aptos para ambientes sin mucha corrosión. Mientras que los aceros del N-80 al Q-125 son orientados para

ambientes que presentan altos niveles de corrosión, por lo que tienen propiedades superiores a los anteriores.

En etapas de producción o liner se puede usar aceros C90 a Q125 porque ya está en contacto con azufres que fragilizan el acero. Los H40 son más dúctiles por lo que no son tan resistentes al azufre.

Existen diferentes grados de acero debido a la variedad de resistencias a las cargas aportadas, esto por la estratigrafía del subsuelo y tensiones de la formación. Además, por la necesidad de resistir el propio peso de la tubería y la corrosión.

#### ***1.3.5.1 Propiedades fisicoquímicas del fluido geotérmico***

El conjunto de propiedades fisicoquímicas influye directamente en el desempeño y la durabilidad del casing, ya que cada uno de estos factores puede desencadenar mecanismos de corrosión específicos, como la sulfidación o la corrosión por picaduras, por ello, un análisis detallado y anticipado de estas características es esencial para la elección del material de revestimiento. Conocer estos parámetros permite seleccionar aceros con propiedades mecánicas y químicas adecuadas, que sean capaces de resistir las cargas, la corrosión y el deterioro que impone el ambiente geotérmico, asegurando así la operatividad y la seguridad de la infraestructura a lo largo de su vida útil, entre las propiedades que pueden afectar más directamente al pozo se tienen:

- El alto contenido de azufre y compuestos sulfurosos:

La presencia elevada de azufre, especialmente en forma de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) y otros compuestos sulfurosos, favorece la formación de ambientes agresivos, estos compuestos pueden reaccionar con el acero,

formando sulfuros que fragilizan el material y aceleran la corrosión, este fenómeno se intensifica en condiciones donde también hay presencia de oxígeno o humedad, facilitando procesos como la sulfidación.

- Elevadas concentraciones de sales y cloruros:

Los fluidos geotérmicos a menudo contienen una alta concentración de sales, particularmente iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), que son conocidos por su agresividad hacia los metales, los cloruros pueden inducir corrosión localizada, como la corrosión por picaduras, debilitando el casing y comprometiendo su resistencia mecánica y a las cargas internas.

- Bajo pH (alta acidez):

Un fluido con pH bajo indica un ambiente ácido, la acidez favorece la disolución de las capas pasivadoras del acero, exponiendo el metal a un ataque corrosivo continuo, esto no solo acelera la corrosión general, sino que también puede aumentar la tasa de degradación en presencia de otros agresores químicos.

- Altas temperaturas:

Las temperaturas elevadas presentes en los fluidos geotérmicos incrementan la velocidad de las reacciones químicas corrosivas, a medida que aumenta la temperatura, se intensifican tanto los ataques ácido-corrosivos como las reacciones de oxidación, lo que puede acortar significativamente la vida útil del casing.

- Presencia de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ):

El  $\text{CO}_2$  disuelto en el fluido puede formar ácido carbónico, lo que reduce el pH del sistema y agrava la corrosión del acero, este proceso es especialmente crítico

en zonas donde la concentración de  $\text{CO}_2$  es alta, ya que potencia la acción corrosiva del fluido.

- Sólidos en suspensión y partículas abrasivas:

Además de los compuestos químicos, la presencia de partículas y sólidos en suspensión puede generar abrasión en la superficie interna del casing, esta abrasión contribuye a la eliminación de recubrimientos protectores y facilita la penetración de agentes corrosivos, provocando una erosión-corrosión que debilita el material.

#### ***1.3.5.2 Cálculo de esfuerzos de trabajo del casing***

Los criterios para la selección pueden hacerse también con base en las fuerzas de tensión y compresión, internas y externas a las que son sometidas las tuberías en las diferentes etapas y comparar esfuerzos de fluencia con valores de tablas referencia. Cuando se está cerca a la base de los largos tubos se tienen esfuerzos de compresión y tensión. Estos esfuerzos se pueden describir como:

- Esfuerzos axiales: Causados por las fuerzas de tensión a las que se somete la tubería durante la corrida y cementación. Su comportamiento se ilustra en la figura 17.

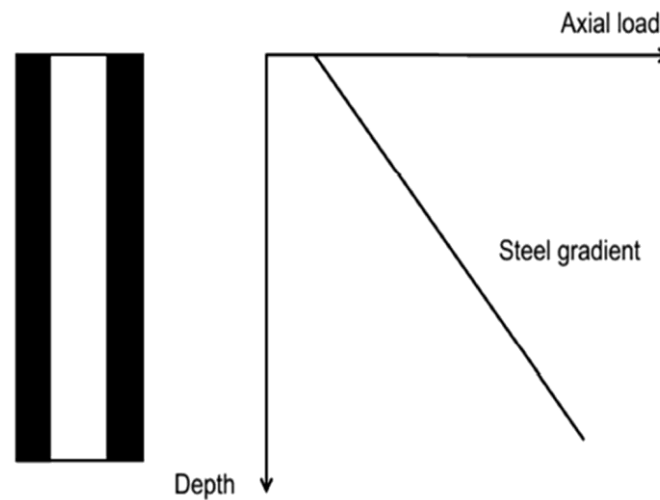


Figura 17. Esquema de esfuerzos axiales sobre el casing

De las Normas (API-Bulletin 5C3), se obtiene que los casing están sometidos a su propio peso de la siguiente forma:

Ecuación 5: cálculo de las fuerzas axiales del propio peso de la tubería.

$$F = \frac{\pi}{4} * (D^2 - d^2) * Y_p \quad (5)$$

Donde:

$F$ : Fuerzas axiales del propio peso de la tubería

$Y_p$ : Esfuerzo de tensión

$d$ : Diámetro interno nominal de la tubería

$D$ : Diámetro externo nominal de la tubería

- Esfuerzos radiales "Burst": Puede ocasionar fallas cuando las presiones internas superan las presiones externas del tubo. Su comportamiento se muestra en la figura 18.

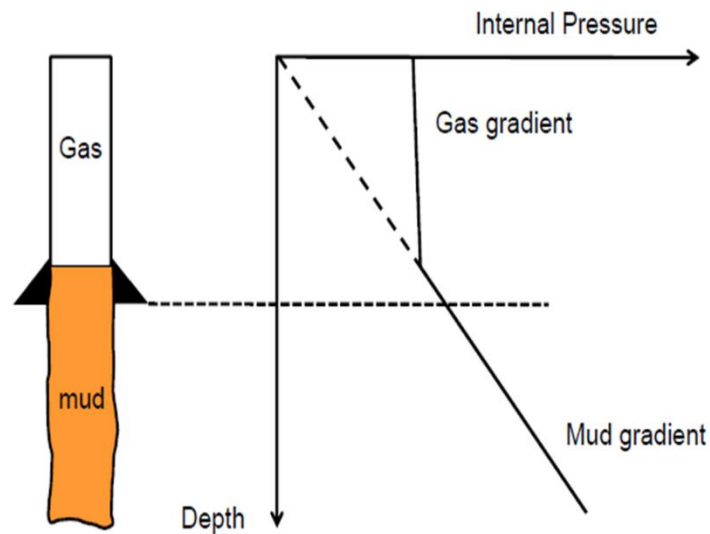


Figura 18. Esquema de esfuerzos radiales en el casing

Los gases no se ven afectados por la profundidad, pero cuando se toca el lodo sí se modifica el gradiente de presión. Si la presión en el lodo supera a la de las paredes, es entonces cuando revienta.

De la Norma API-Bulletin 5C3, se obtiene que los casings están sometidos a presiones internas > a las externas de la siguiente forma:

Ecuación 6: cálculo de las presiones internas del casing.

$$\rho = 0.875(2t * Y_p)/D \quad (6)$$

Donde:

$\rho$ : Presión interna mínima

$Y_p$ : Esfuerzo de tensión

$t$ : Espesor de pared nominal de la tubería

$D$ : Diámetro externo nominal de la tubería

- Esfuerzos al Colapso (Collapse): Causado por presiones negativas dentro del pozo o por malas cementaciones que dejan líquido entre el casings y la pared. Puede ocasionar fallas cuando existen pérdidas de lodo y el tubo se ve sometido a presión de vacío en su interior. Su gradiente de comportamiento se observa en la figura 19.

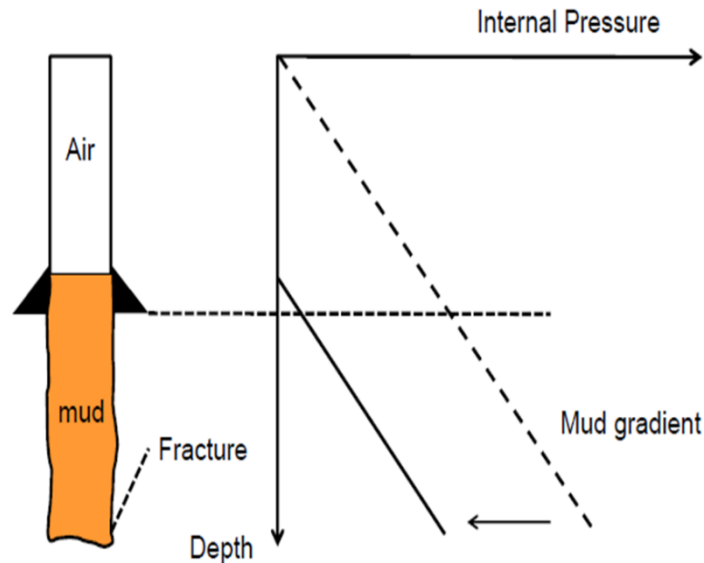


Figura 19. Esquema de esfuerzo de colapso sobre el casing

De la Norma API-Bulletin 5C3, se obtiene que los casings están sometidos a presiones externas > a las internas de la siguiente forma:

Ecuación 7: cálculo de presiones internas del casing cuando  $D/t < 15$

$$P = 2Y_p \left[ \frac{\frac{D}{t} - 1}{\left(\frac{D}{t}\right)^2} \right]; \quad \frac{D}{t} < 15 \quad (7)$$

Ecuación 8: cálculo de presiones internas del casing cuando  $D/t > 25$

$$P = \left[ \frac{46.95 \times 10^6}{\frac{D}{t} * \left(\frac{D}{t} - 1\right)^2} \right]; \quad \frac{D}{t} > 25 \quad (8)$$

Donde:

$P$ : Presión interna mínima

$Y_p$ : Esfuerzo de tensión

$t$ : Espesor de pared nominal de la tubería

$D$ : Diámetro externo nominal de la tubería

La tubería debe ser tensionada durante la cementación:

La pre-tensión ayuda a compensar las variaciones de longitud debido a los cambios de temperatura.

Se evita el "pandeo" de la tubería, se elimina cualquier movimiento de la tubería durante la conexión de los equipos en la superficie.

Ecuación 9: longitud compensada en la tubería

$$\Delta L = MD_{zK} * \alpha * \Delta v \quad (9)$$

Ecuación 10: fuerza de pre-tensión

$$F_v = \frac{E * A * \Delta L}{MD_{zk}} \quad (10)$$

Donde:

$E$ : Módulo de elasticidad del acero:  $2.6 \times 10^5$  [N/mm<sup>2</sup>]

$MD_{zk}$ : Profundidad medida desde la cabeza del cemento (m)

$A$ : Área de la sección transversal del casing (mm<sup>2</sup>)

$\alpha$ : Coeficiente de variación de longitud  $11.8 \times 10^{-5}$  [1/°K]

$\Delta v$ : Diferencia en el cambio de temperatura (°C o K)

El liner es una tubería que no se coloca desde el nivel cero. como el resto de etapas, sino que se ubica en el fondo del pozo con una sujeción especial colocada en el casing de la etapa anterior.

Normalmente, la tubería se instala 50 m sobre el nivel final de la etapa anterior.

La conexión entre tuberías se toma de tablas según las características antes definidas (esfuerzo, diámetros, carga por unidad de longitud, etc.)

### **1.3.6 Cementación**

La cementación es un proceso en la construcción de pozos geotérmicos, ya que proporciona soporte estructural al pozo y evita la migración de fluidos entre diferentes formaciones geológicas. El cemento se inyecta en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y las paredes del pozo, sellando el espacio y proporcionando una barrera impermeable.

El proceso de cementación implica la inyección de una mezcla de cemento y agua, que se introduce a través de la tubería hasta que llena todo el espacio anular. Para asegurar que el cemento fluya de manera uniforme, se utilizan zapatas guías y collares flotadores, que permiten controlar la dirección del flujo y evitar el contraflujo de fluidos geotérmicos.

Su principal objetivo es permitir que la estructura del pozo soporte el peso de las diversas capas litosféricas del subsuelo, mientras asegura la integridad operativa a lo largo de su vida útil, siendo esta un promedio de 15 años, pasado este tiempo se debe de dar mantenimiento, puesto que es posible que el diámetro del pozo haya aumentado de tamaño por el tiempo y uso, también, la cementación contribuye al aislamiento de zonas sensibles y al mantenimiento de la tubería de revestimiento en condiciones óptimas.

La cementación sirve de aislamiento anular, esta función, considerada la más importante, permite aislar eficazmente las distintas etapas del pozo. De este modo, se evita la contaminación cruzada entre los fluidos geotérmicos y los acuíferos de agua dulce, al tiempo que se mitiga el riesgo de interacción con formaciones inestables, el correcto aislamiento no solo preserva la productividad del pozo, sino que también minimiza los riesgos ambientales y operativos.

La cementación actúa como soporte de la tubería de revestimiento, siendo la columna de cemento la que ayuda a mantener la tubería de revestimiento en posición estable, asegurando su alineación y evitando desplazamientos o deformaciones bajo las presiones del subsuelo, al soportar el peso de las capas superiores del terreno, la cementación contribuye a la estabilidad general del pozo durante la perforación y operación, también actúa de protección de la tubería de revestimiento, esto ya que la cementación protege el revestimiento de la corrosión y posibles daños que puedan ocurrir durante la extracción de la sarta de perforación, al reducir el riesgo de colapsos y deterioro, se garantiza la integridad estructural del pozo y se prolonga su vida útil.

- Abandono del pozo

Cuando un pozo no resulta económicamente viable, el proceso de cementación permite su abandono seguro, para ello, se colocan tapones de cemento en las formaciones abiertas y alrededor de las zapatas y acuíferos, sellando completamente el pozo, lo que evita la fuga de fluidos y posibles daños ambientales futuros.

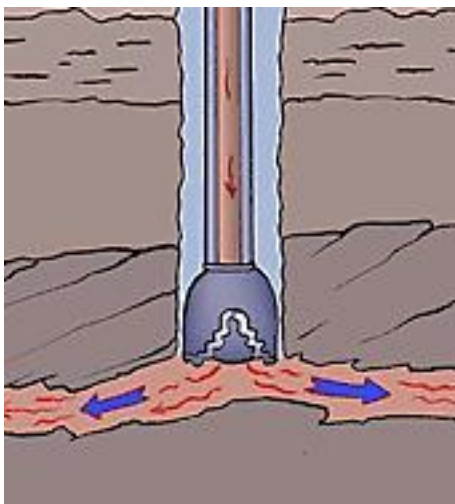
- Reparación de fugas y control de comunicación entre etapas

La cementación también es fundamental para corregir fugas en la tubería de revestimiento y solucionar problemas de comunicación indeseada entre las diferentes etapas del pozo, esta capacidad de reparación refuerza la integridad operativa y garantiza el correcto funcionamiento del sistema a lo largo del tiempo.

La cementación en pozos geotérmicos se puede considerar en 2 grupos importantes, la cementación de pérdidas de circulación, y la cementación de tuberías de revestimiento, además de algunas prácticas como cuando la tubería está demasiado desgastada, entonces se pone otra al interior de ella y se cementa, así que se logra recuperar el pozo, aunque tenga un diámetro menor.

- Cementación de pérdidas de circulación.

Durante la perforación de pozos geotérmicos, es común encontrar grietas o cavernas naturales en la formación que impiden la circulación adecuada de fluidos hacia la superficie, este fenómeno, conocido como pérdida de circulación (Figura 20), requiere un proceso específico de cementación para sellar estas zonas permeables y asegurar la continuidad de las operaciones de perforación, el procedimiento consiste en aplicar un tapón de cemento en la sección afectada, bloqueando el flujo a través de las zonas de alta permeabilidad, posteriormente, se perfora dicho tapón para garantizar que el pozo mantenga una pared sólida de cemento, eliminando la exposición directa a la formación permeable y evitando nuevas pérdidas.



*Figura 20. Esquema de proceso de cementación de pérdidas de circulación*

*Fuente: Owolabi, O., Emmanuel, A., Okafor, I., Daniel, N., Igbine, A., & Maduabuchi, G. (2020, 11–13 de agosto). The evaluation of coconut fibre as a loss circulation material in drilling operation (Paper No. SPE-203756-MS). En Proceedings of the SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition (ISBN 978-1-61399-785-7). Society of Petroleum Engineers.*

La selección de materiales es clave para lograr un sellado eficaz y mantener la estabilidad del pozo, entre los principales componentes se encuentran:

- Cemento Clase A (Portland): Utilizado en condiciones normales para cimentaciones generales.
- Cemento Clase G y Clase H: Estos tipos de cemento se emplean en pozos profundos debido a su mayor resistencia a presiones elevadas y altas temperaturas.
- Bentonita: Se añade para aumentar la viscosidad y densidad de la mezcla, lo que favorece la generación de un tapón eficiente en la zona afectada.

- Cloruro de calcio: Actúa como acelerador del fraguado, reduciendo el tiempo de endurecimiento del cemento y permitiendo una operación más rápida.
- Harina de sílice: Su función principal es incrementar el volumen del cemento, mejorando la capacidad de sellado en zonas de alta permeabilidad.

Un indicador común de pérdidas de circulación es cuando el volumen del lodo que retorna a la superficie es menor que el volumen inyectado inicialmente, esto sugiere la presencia de una zona con alta permeabilidad que está absorbiendo los fluidos de perforación, para solucionar este problema, se realiza un proceso de cementación en la zona afectada.

- Cementación de tuberías de revestimiento.

Su objetivo es inyectar cemento en el espacio anular entre la tubería y las paredes del pozo, o entre dos tuberías de revestimiento, con el fin de fijar la tubería en su posición y aislarla de formaciones inestables o no deseadas, esta técnica garantiza la integridad estructural del pozo y evita problemas operativos, como la comunicación indeseada entre formaciones, este tipo de cementación se lleva a cabo mediante tres etapas esenciales, selección de materiales, cálculo de volúmenes y balance de masa.

#### a) Materiales.

La elección adecuada de materiales es esencial para asegurar la eficacia del proceso de cementación, ya que cada aditivo cumple una función específica que responde a las condiciones del pozo. Entre las opciones más comunes se encuentran:

- Cemento Clase G y Clase H: Especialmente diseñados para resistir altas presiones y temperaturas, adecuados para pozos profundos y exigentes.
- Harina de sílice: Utilizada para aumentar el volumen del cemento y mejorar la resistencia en entornos de alta temperatura.
- Retardador de fraguado: Prolonga el tiempo de endurecimiento del cemento, permitiendo maniobras más controladas en pozos profundos o de compleja geometría.
- Reductor de fricción: Facilita el bombeo de la mezcla, disminuyendo la resistencia dentro de las tuberías y optimizando el desplazamiento del cemento hacia el espacio anular.
- Reductor de filtrado: Evita la pérdida de agua del cemento hacia las formaciones permeables, lo que garantiza la integridad de la mezcla durante su fraguado.
- Antiespumante: Minimiza la formación de espuma durante la inyección del cemento, asegurando un flujo continuo y evitando la aparición de bolsas de aire que puedan comprometer el sellado.

En el caso de los cementos se tienen propiedades esenciales a tomar en cuenta:

#### Cemento Clase A:

- Especificación normal del API

|                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| Densidad            | 15.7 ppg                 |
| Agua de mezcla, 46% | 5.19 gal/sk              |
| Rendimiento         | 1.17 ft <sup>3</sup> /sk |

- Para casing de superficie y pozos poco profundos
- Diseñado para aplicarse hasta 6 000 ft
- Similar al ASTM C150, Tipo I (Construcción)

#### Cemento Clase B:

- Especificación normal del API

|                |                          |
|----------------|--------------------------|
| Densidad       | 15.7 ppg                 |
| Agua de mezcla | 46%, 5.19 gal/sk         |
| Rendimiento    | 1.17 ft <sup>3</sup> /sk |

- Usado para cementación de casing de superficie (guía) o pozos poco profundos
- Desarrollado para ser usado hasta 6 000 ft con precaución
- Similar al ASTM C150, Type II (construcción)
- De moderada a alta resistencia a los sulfatos

### Cemento Clase C:

- Especificación normal del API

|                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| Densidad            | 14.8 ppg                 |
| Agua de mezcla, 56% | 6.3 gal/sk               |
| Rendimiento         | 1.32 ft <sup>3</sup> /sk |

- Para casing de superficie y pozos poco profundos
- Ordinaria y alta resistencia a los sulfatos
- Diseñado para ser aplicado hasta 6 000 ft
- Similar al ASTM C150, TIPO III para la construcción

### Cemento Clase G:

- Especificación normal del API

|                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| Densidad            | 15.8 ppg                 |
| Agua de mezcla, 44% | 4.96 gal/sk              |
| Rendimiento         | 1.14 ft <sup>3</sup> /sk |

- Cemento multipropósito
- De mayor fineza que el Clase H
- Diseñado para ser usado en todas las profundidades con aditivos
- Es la clase de cemento más utilizada en el mundo

### Cemento Clase H:

- Especificación normal del API

|                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| Densidad            | 16.5 ppg                 |
| Agua de mezcla, 44% | 4.28 gal/sk              |
| Rendimiento         | 1.05 ft <sup>3</sup> /sk |

- Cemento multipropósito
- Usualmente mezclado a 15.6 o 15.7 ppg
- Diseñado para todas las profundidades con aditivos
- Densidad mínima sin aditivos - 15.5 ppg

#### b) Volúmenes.

El cálculo preciso de los volúmenes de cemento garantiza una cementación eficiente en pozos geotérmicos, la mezcla utilizada, conocida como lechada de cemento, es una suspensión fluida que se bombea al espacio anular entre la tubería de revestimiento y las paredes del pozo, o entre dos tuberías, una vez inyectada, esta mezcla fragua, proporcionando estabilidad estructural y aislamiento entre las formaciones atravesadas, el cálculo del volumen de lechada necesario es fundamental para evitar tanto insuficiencias que dejen espacios sin sellar como excesos que desperdicien material, este cálculo se basa en la geometría cilíndrica del pozo, dado que tanto el agujero perforado como las tuberías de revestimiento tienen una geometría aproximadamente cilíndrica, el cálculo del volumen de lechada se basa en la fórmula para el volumen de un cilindro (Figura 21).

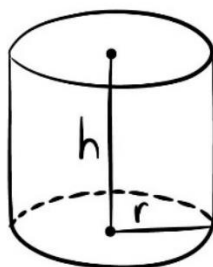


Figura 21. Dimensiones de cilindro

Ecuación 11: volumen de un cilindro para cada etapa del pozo.

$$V = ((2r)^2\pi/4) * h = (\pi D^2/4) * h \quad (11)$$

Donde,

$h$ : Altura del cilindro

$r$ : Radio del cilindro

$D$ : Diámetro del cilindro

El volumen parcial del pozo se calcula por:

Ecuación 12: volumen parcial del pozo.

$$V_p = 0.5067D^2 \quad (12)$$

Donde:

$D$ : Diámetro del cilindro

El resultado esta expresado en  $l/m$  tomando en cuenta que el diámetro debe estar en pulgadas<sup>2</sup>. Entonces el volumen parcial anular del pozo es obtenido bajo el diagrama de la figura 22 y la ecuación 13.

---

<sup>2</sup> La mezcla de unidades se ve presente por la conversión interna de ellas en las ecuaciones, además que es debido a la diversidad de uso de unidades de medidas en el mercado nacional.

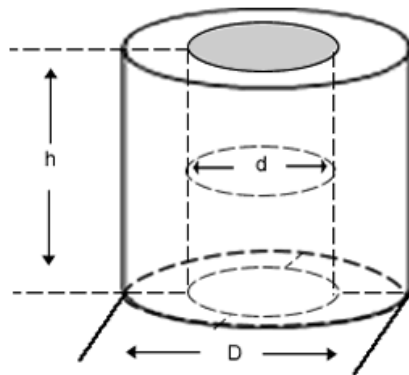


Figura 22. Dimensiones de un cilindro hueco

Fuente: Solomatemáticas. Volúmenes de sólidos.

Ecuación 13: volumen parcial anular del pozo.

$$V_p = 0.5067(D^2 - d^2) \quad (13)$$

Donde:

$D$ : Diámetro del agujero perforado.

$d$ : Diámetro de la tubería de revestimiento.

Con esto se puede determinar el volumen de la lechada cementante " $V_L$ "

Ecuación 14: cálculo del volumen de la lechada cementante

$$V_L = V_p * H \quad (14)$$

Siendo:

$H$ : Altura de la etapa expresada en metros

$V_p$ : Volumen parcial anular del pozo expresado en  $l/m$

Este cálculo se hace por cada etapa. El resultado obtenido por la ecuación 14, será un valor de volumen en litro de la cantidad de lechada cementante, dicho resultado puede expresarse en barriles estadounidenses (*BBL*) por medio de la conversión:

$$1 \text{ BBL (barril US)} = 42 \text{ galones} = 159 \text{ l}$$

c) Balance de masa

La lechada es una mezcla homogénea de cemento, agua y aditivos, diseñada para cumplir con las exigencias específicas de cada pozo, como alta temperatura, presión, o permeabilidad de la formación, esta mezcla debe ser lo suficientemente fluida para desplazarse sin obstrucciones, pero también capaz de fraguar con rapidez y resistencia para cumplir sus funciones de soporte y aislamiento, y es aquí donde se vuelve importante el balance de masa.

Ecuación 15: análisis por volumen de la lechada.

$$V_L/saco = V_{cem} + V_{sil} + V_{dis} + V_{agua} \quad (15)$$

Siendo,

$V_{cem}$ : Volumen de cemento

$V_{sil}$ : Volumen de la sílica

$V_{dis}$ : Volumen de dispersante

$V_{agua}$ : Volumen de agua

Las propiedades fisicoquímicas que se toman en cuenta para la lechada de cementación son la densidad, viscosidad plástica, resistencia de gel, tiempo de

permeabilidad, filtrado a alta presión-alta temperatura, tiempo de fraguado y curado, y la resistencia a la compresión.

a) Densidad

La densidad es la relación entre la masa de una sustancia y su volumen, este parámetro es fundamental porque afecta la flotabilidad de la tubería de revestimiento y la capacidad del cemento para resistir las presiones internas y externas del pozo, un control adecuado de la densidad garantiza que el cemento soporte la presión sin generar pérdidas de circulación ni comprometer la estabilidad estructural.

b) Viscosidad plástica

La viscosidad plástica mide la resistencia que presenta un fluido al fluir bajo un esfuerzo continuo, una viscosidad adecuada permite que la lechada fluya de manera eficiente por el espacio anular y cubra uniformemente las paredes del pozo, evitando zonas no cementadas y garantizando una distribución homogénea.

c) Resistencia de gel

La resistencia de gel es la capacidad de la lechada de formar una estructura cuando se encuentra en reposo, esta propiedad es crucial para evitar la sedimentación de sólidos durante paradas temporales en el bombeo, asegurando que la mezcla permanezca uniforme y lista para continuar el desplazamiento cuando se retome la operación.

d) Tiempo de bombeabilidad o espesamiento

El tiempo de bombeabilidad, también llamado tiempo de espesamiento, es el periodo durante el cual la lechada permanece fluida y puede ser bombeada sin dificultades, este tiempo es crítico en pozos geotérmicos profundos, donde la operación debe completarse antes de que el cemento comience a endurecerse, evitando problemas como obstrucciones o cementación incompleta.

e) Filtrado a alta presión — alta temperatura

El filtrado bajo condiciones de alta presión y alta temperatura se refiere a la pérdida de agua de la mezcla hacia las formaciones circundantes, controlar este filtrado es importante para mantener la integridad del cemento, ya que una pérdida excesiva de agua puede debilitar la mezcla y generar fracturas o puntos vulnerables en la zona cementada.

f) Tiempo de fraguado y curado

El fraguado es el proceso inicial en el que la lechada pasa de un estado líquido a uno sólido, mientras que el curado se refiere a la ganancia progresiva de resistencia a lo largo del tiempo, ambos procesos deben controlarse cuidadosamente para asegurar que el cemento alcance una dureza suficiente y eficiente sin demoras operativas, garantizando que la estructura pueda soportar las condiciones del pozo

g) Resistencia a la compresión (prueba no destructiva y destructiva)

La resistencia a la compresión es la capacidad del cemento para soportar cargas sin colapsar, en la cementación, esta resistencia sirve para mantener la integridad estructural del pozo bajo las condiciones de presión del subsuelo.

Las pruebas destructivas evalúan la resistencia máxima al romper el material, mientras que las pruebas no destructivas permiten medir esta propiedad sin comprometer la integridad de la estructura.

## Capítulo 2. Estructuración Preliminar del Modelo de Solución

En este apartado se describe el procedimiento detallado para la resolución manual de un ejercicio representativo de diseño de pozos geotérmicos.

El desarrollo incluye el cálculo de cada etapa del diseño, considerando las especificaciones técnicas y las condiciones del pozo, como profundidades, diámetros de barrenas y tuberías, así como los materiales utilizados. Si bien este ejemplo se enfoca en un pozo de producción, el procedimiento general es adaptable para los otros tipos de pozos (exploración y reinyección), donde las principales diferencias radican en el número de etapas y los parámetros dimensionales.

Este ejemplo sirve como referencia para identificar las operaciones fundamentales que serán automatizadas en el software. Asimismo, proporciona una base comprensible para validar los resultados esperados y verificar la precisión del modelo computacional desarrollado posteriormente.

A continuación, se desarrolla el ejercicio que tiene por enunciado el siguiente.

### 2.1. Enunciado Del Ejemplo Tipo

Se ha de perforar verticalmente un pozo geotérmico productor de 4 etapas en una zona que se ha pronosticado con un buen recurso (entrega únicamente vapor), el ambiente en este reservorio está afectado por el alto contenido de azufre, la ingeniería de reservorios indica que del pozo se debe extraer un flujo de masa de 190 kg/s de vapor seco con la presión en el reservorio de 2 MPa (densidad 50 kg/m<sup>3</sup>) y que sale al ambiente a 1 atm (densidad 24.670 kg/m<sup>3</sup>), el coeficiente adiabático del vapor geotérmico es de 1.330 y la profundidad vertical del pozo es de 1 500 metros hasta la entrada del reservorio. Seleccione los aspectos enlistados a continuación:

- a) Diámetros de barrenas a utilizar por etapa.
- b) Diámetros de tuberías de revestimiento por etapa.
- c) Calcular el WOB.
- d) Grado de tubería de revestimiento.
- e) Cantidad de fluido de perforación a utilizar en todo el proceso.
- f) Cantidad de tuberías de revestimiento a utilizar si cada una mide 10 metros de longitud.

## 2.2. Resolución Manual del Ejemplo Tipo

Primeramente, se debe enlistar los datos de entrada del enunciado:

- Pozo de 4 etapas de vapor dominante
- Alta exposición a propiedades fisicoquímicas dañinas
- $\dot{m} = 190 \frac{kg}{s}$  de vapor seco
- $P_r = 2 MPa$
- $\rho_r = 50 kg/m^3$
- $P_s = 1 atm = 101.325 kPa$
- $\rho_s = 24.670 kg/m^3$
- $\gamma = 1.330$
- *Profundidad* = 1500 m

Luego, realizar un esquema de la situación plasmada en el enunciado para poder tener claridad ante el problema dado (Figura 23).

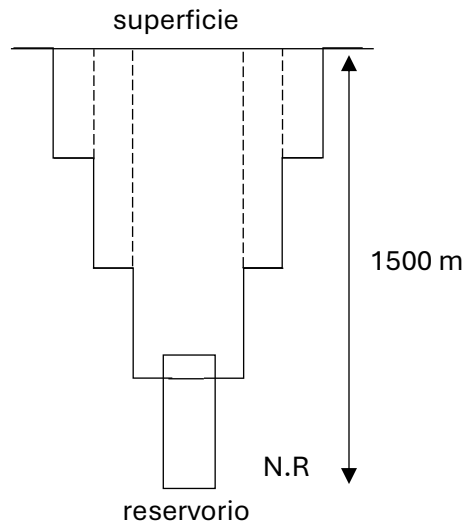


Figura 23. Esquema del pozo geotérmico de producción del ejemplo tipo.

Con los datos dados se debe empezar calculando el diámetro que debe tener la tubería de revestimiento de la etapa de producción para obtener los 190 kg/s. Primero se debe apoyar de la conservación de masa y energía para obtener el área de esa etapa.

Ecuación 16: conservación de masa de forma general entre la superficie y el reservorio.

$$\dot{m} = \rho_r A_r v_r = \rho_s A_s v_s \quad (16)$$

Siendo,

$\dot{m}$ : Flujo másico del fluido geotérmico que se desea circular por el pozo en unidades de  $kg/s$

$\rho_r$ : Densidad del fluido geotérmico en el reservorio en unidades de  $kg/m^3$

$A_r$ : Área transversal del reservorio en metros

$v_r$ : Velocidad del fluido geotérmico en el reservorio en  $m/s$

$\rho_s$ : Densidad del fluido geotérmico en la superficie en unidades de  $kg/m^3$

$A_s$ : Área transversal en la superficie en metros

$v_s$ : Velocidad del fluido geotérmico en la superficie en  $m/s$

Ecuación 17: conservación de masa en términos de velocidad entre la superficie y el reservorio.

$$v_r = v_s \frac{\rho_s}{\rho_r} \quad (17)$$

Ecuación 18: conservación de energía entre la superficie y el reservorio.

$$\frac{v_r^2}{2} + gz_r + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_r}{\rho_r} = \frac{v_s^2}{2} + gz_s + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_s}{\rho_s} \quad (18)$$

Donde,

$\gamma$ : Peso específico del fluido geotérmico (tomado como vapor de agua en general)

$g$ : Gravedad en  $m/s^2$

$z_r$ : Altura a la que está el reservorio respecto a un nivel de referencia, en unidades de metros

$z_s$ : Altura a la que está la superficie respecto a un nivel de referencia, en unidades de metros

Siendo que el nivel de referencia se ha tomado en el reservorio,  $z_r$  es igual a cero, eliminando ese término. Sustituyendo la (17) en (18).

Ecuación 19: sustitución de ecuación (17) en (18).

$$\frac{v_s^2 \rho_s^2}{2 \rho_r^2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_r}{\rho_r} = \frac{v_s^2}{2} + gz_s + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_s}{\rho_s} \quad (19)$$

Ecuación 20: sustituyendo todas las variables conocidas en (19).

$$\begin{aligned} \frac{v_s^2}{2} \left( \frac{24.670 \frac{kg}{m^3}}{50 \frac{kg}{m^3}} \right)^2 + \left( \frac{1.330}{1.330 - 1} \right) \left( \frac{2 \times 10^6}{50 \frac{kg}{m^3}} \right) \\ = \frac{v_s^2}{2} + \left( 9.810 \frac{m}{s^2} \right) (1500 m) + \frac{1.330}{1.330 - 1} \frac{101.325 \times 10^3 Pa}{24.670 \frac{kg}{m^3}} \end{aligned} \quad (20)$$

Resolviendo para  $v_s$ :

$$v_s = 586.100 m/s$$

Regresando a la ecuación (16) para calcular el diámetro:

Ecuación 21: ecuación de flujo másico en el reservorio.

$$\dot{m} = \rho_r A_r v_r \quad (21)$$

Ecuación 22: ecuación del flujo másico sustituyendo ecuación (17).

$$\dot{m} = \rho_r * \frac{\pi}{4} D_{producción}^2 * v_s \frac{\rho_s}{\rho_r} \quad (22)$$

Donde,

$D_{producción}$ : Diámetro correspondiente a la etapa más cercana al reservorio sin tomar en cuenta el liner, la correspondiente para la definición del flujo másico a circular.

Ecuación 23: ecuación de diámetro de producción despejada.

$$D_{producción} = \sqrt{\frac{\dot{m}}{\frac{\pi}{4} v_s \rho_s}} = \sqrt{\frac{190 kg/s}{\frac{\pi}{4} * 586.100 \frac{m}{s} * 24.670 \frac{kg}{m^3}}} \quad (23)$$

Dando como resultado:

$$D_{producción} = 0.129 m$$

Ecuación 24: conversión de unidades de diámetro de producción.

$$D_{producción} = 0.129 \text{ m} \times \frac{39.370 \text{ pulg}}{1 \text{ m}} \quad (24)$$

$$D_{producción} = 5.090 \text{ pulg}$$

A partir de este punto se tienen dos tipos de diseño de pozos para el caso de los convencionales (de producción y de reinyección), estos dos tipos son basados en la fuente de la cual se seleccionan los diámetros de tubería de revestimiento y de barrena ya que existen datos que son válidos para el contexto de El Salvador y otros que son para contexto internacional bajo estándares normados. A continuación, se verá el desarrollo de cada uno.

### 2.2.1. Selección Nacional

Para realizar la selección de diámetros según el caso nacional de El Salvador se basará en los valores que usualmente se utilizan en ese contexto, estos están en la tabla 17.

Tabla 17. Diámetros de agujeros por cada etapa de perforación del pozo

| Etapa | Diámetro de agujero (pulg) | Diámetro de tubería (pulg) | Función            |
|-------|----------------------------|----------------------------|--------------------|
| 1     | 40                         | 36                         | Estructural        |
| 2     | 32 – 26                    | 24 ½ – 20                  | Superficial        |
| 3     | 23 – 17 ½                  | 18 ⅝ – 13 ⅜                | Intermedia         |
| 4     | 17 ½ – 12 ¼                | 13 ⅜ – 9 ⅝                 | Anclaje/Producción |
| 5     | 12 ¼ – 8 ½                 | 9 ⅝ – 7 ⅝ o 7              | Liner              |

En ella se observa que el valor de tubería de revestimiento (casing) mínimo para la etapa de producción es de 9 ⅝ pulg, por lo que se elegirá este por ser el más próximo al valor obtenido.

$$D_{\text{producción nacional}} = 9 \frac{5}{8} \text{ pulg}$$

Para calcular los siguientes valores de diámetros de tuberías de revestimiento se basa en la tabla 18 con diferencias comúnmente utilizadas en el país para pozos convencionales como es el caso del pozo de producción que se está diseñando.

Tabla 18. Rangos de diferencias entre cada etapa en pozos convencionales. Cantidad en pulgadas que debe reducirse el diámetro.

| <b>Etapa</b> | <b><math>\Delta D</math> de diámetro de agujero (pulg)</b> | <b><math>\Delta D</math> de diámetro de tubería (pulg)</b> | <b>Función</b>     |
|--------------|--|--|--------------------|
| 1            |  |  | Estructural        |
| 2            | 8 – 14   | 11 ½ – 16  | Superficial        |
| 3            | 9 – 8 ½  | 5 ⅞ – 6 ⅝  | Intermedia         |
| 4            | 5 ½ – 5 ¼  | 5 ¼ – 3 ¾  | Anclaje/Producción |
| 5            | 5 ¼ – 3 ¾  | 3 ¾ – 2 o 2 ⅝  | Liner              |

Para el diseño de los diámetros de las demás etapas se puede elegir cualquiera de los valores de cada rango según etapa. Para este ejemplo se elegirán los valores inferiores resultando en la tabla 19 para las cuatro etapas del ejemplo.

Tabla 19. Diámetros seleccionados con base a valores convencionales en El Salvador.

| <b>Etapa</b> | <b>Diámetro de barrena nacional (pulg)</b> | <b>Diámetro de tubería de revestimiento nacional (pulg)</b> |
|--------------|--|---|
| Estructural  | 40   | 36  |
| Superficial  | 26   | 20  |
| Producción   | 12 ¼                                       | 9 ⅝   |
| Liner        | 8 ½  | 7   |

Cálculo De WOB:

Es importante determinar el peso máximo sobre la barrera que puede soportar. Este se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 25: cálculo de peso máximo sobre la barrena (WOB)

$$WOB = 4400 \text{ lb} * \phi_{\text{barrena}} (\text{pulg}) \quad (25)$$

Haciendo los respectivos cálculos para cada etapa se obtiene la tabla 20.

*Tabla 20. Valores calculados de WOB para cada barrena seleccionada.*

| <b>Etapa</b> | <b>Diámetro de<br/>barrena<br/>nacional<br/>(pulg)</b> | <b>WOB (lb-pulg)</b> |
|--------------|--|----------------------|
| Estructural  | 40   | 176000               |
| Superficial  | 26   | 114400               |
| Producción   | 17 ½   | 77000                |
| Liner        | 12 ¼   | 53900                |

### **2.2.2. Selección Normada por el Instituto Americano de Petróleo (API)**

Por otro lado, también se puede tener la selección del diámetro con base a la norma del Instituto Americano de Petróleo. Para ello se debe de tomar el diámetro calculado para producción y con él se ingresa a la tabla de tuberías de revestimiento según la Asociación Internacional de Contratistas de Perforación IADC que es la tabla 21.

Tabla 21. Propiedades de tuberías de revestimiento con respecto a su diámetro nominal, normadas según la IADC.

| Tamaño de diámetro externo (pulg) | Diámetro interno (pulg) |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 6 5/8                             | 6.049                   |
|                                   | 6.049                   |
|                                   | 5.921                   |
|                                   | 6.049                   |
|                                   | 5.921                   |
|                                   | 5.921                   |
|                                   | 5.791                   |
|                                   | 5.675                   |
|                                   | 5.921                   |
|                                   | 5.791                   |
|                                   | 5.675                   |
|                                   | 5.921                   |
|                                   | 5.791                   |
|                                   | 5.675                   |
|                                   | 5.921                   |
|                                   | 5.791                   |
| 5.675                             |                         |

Fuente: Bourgoyne, A. T. Jr., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young, F. S. Jr. (1986). *Applied drilling engineering* (Vol. 2). Society of Petroleum Engineers.

Donde se selecciona el diámetro externo de 6 5/8 pulg de la tabla 21 ya que este es el que presenta valores de diámetro interno cercanos al calculado de 5.09 pulg. Para las siguientes etapas posteriores y superiores se eligen de acuerdo con los valores normados en la misma tabla de IADC (Tabla 22 y 23).

Tabla 22. Propiedades de tuberías de revestimiento con respecto a su diámetro nominal, normadas según la IADC. (continuación).

| Tamaño de diámetro externo (pulg) | Diámetro interno (pulg) |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 5 ½                               | 5.012                   |
|                                   | 5.012                   |
|                                   | 4.950                   |
|                                   | 4.892                   |
|                                   | 5.012                   |
|                                   | 4.950                   |
|                                   | 4.892                   |
|                                   | 4.892                   |
|                                   | 4.778                   |
|                                   | 4.670                   |
|                                   | 4.892                   |
|                                   | 4.778                   |
|                                   | 4.670                   |
|                                   | 4.892                   |
|                                   | 4.778                   |
|                                   | 4.670                   |
|                                   | 4.892                   |
|                                   | 4.778                   |
|                                   | 4.670                   |
|                                   | 4.548                   |
| 4.200                             |                         |
| 4.892                             |                         |
| 4.778                             |                         |
| 4.670                             |                         |
| 4.892                             |                         |
| 4.778                             |                         |
| 4.670                             |                         |

Fuente: Bourgoyne, A. T. Jr., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young, F. S. Jr. (1986). *Applied drilling engineering* (Vol. 2). Society of Petroleum Engineers.

Tabla 23. Propiedades de tuberías de revestimiento con respecto a su diámetro nominal, normadas según la IADC. (continuación)

| Tamaño de diámetro interno (pulg) | Diámetro interno (pulg) |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 7                                 | 6.538                   |
|                                   | 6.456                   |
|                                   | 6.456                   |
|                                   | 6.366                   |
|                                   | 6.276                   |
|                                   | 6.456                   |
|                                   | 6.366                   |
|                                   | 6.276                   |
|                                   | 6.366                   |
|                                   | 6.276                   |
|                                   | 6.184                   |
|                                   | 6.094                   |
|                                   | 6.004                   |
|                                   | 5.920                   |
|                                   | 6.366                   |
|                                   | 6.276                   |
|                                   | 6.184                   |
| 6.094                             |                         |
| 6.004                             |                         |
| 7 $\frac{5}{8}$                   | 7.025                   |
|                                   | 6.969                   |
|                                   | 6.969                   |
|                                   | 6.969                   |
|                                   | 6.875                   |
|                                   | 6.765                   |
|                                   | 6.625                   |
|                                   | 6.501                   |
|                                   | 6.435                   |
|                                   | 6.375                   |

Fuente: Bourgoyne, A. T. Jr., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young, F. S. Jr. (1986). *Applied drilling engineering* (Vol. 2). Society of Petroleum Engineers.

Obteniendo la tabla 24 de resultados.

*Tabla 24. Valores seleccionados de tabla normada. Valores en pulgadas.*

| <b>Etapas</b> | <b>Diámetro de tubería de revestimiento normada (pulg)</b> |
|---------------|--|
| Estructural   | 7 ½  |
| Superficial   | 7  |
| Producción    | 6 ½  |
| Liner         | 5 ½  |

Mientras que, para seleccionar el diámetro de las barrenas a utilizar, primero se debe tomar en cuenta cuánto es el rango de espesor que debe tener el pozo en cada etapa respectiva. Para ello se guía por medio de la tabla 25 obtenida de los rangos dados usualmente para los diámetros de barrena y casing en El Salvador.

*Tabla 25. Rangos de espesor de cementación típicamente usados en el país. Distancia entre el radio de la tubería de revestimiento y el radio del agujero perforado con barrena. Valores en pulgadas.*

| <b>Etapas</b> | <b>Espesor de cementación máximo</b> | <b>Espesor de cementación mínimo</b> |
|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Estructural   | 2                                    | 2                                    |
| Superficial   | 3 ¾                                  | 3                                    |
| Intermedia    | 2 ½                                  | 2                                    |
| Producción    | 2                                    | 1 ½                                  |
| Liner         | 1 ½                                  | ¾ - 4/9                              |

Calculando los valores que corresponden de acuerdo a los diámetros de tuberías de revestimiento previamente seleccionados, se obtiene la tabla 26.

Tabla 26. Rango de diámetros de barrenas calculados según tabla de espesores de cementación. Valores en pulgadas.

| Etapa       | Diámetro de barrena máximo | Diámetro de barrena mínimo |
|-------------|----------------------------|----------------------------|
| Estructural | 11 ½                       | 11 ⅝                       |
| Superficial | 14 ½                       | 13                         |
| Producción  | 10 ¾                       | 9 ¼                        |
| Liner       | 8 ⅝                        | 7 – 6 ¾                    |

Para seleccionar la barrena a utilizar se apoya en tablas normadas por fabricantes de barrenas (Tabla 27 y 28) como es el caso de la Integradora de Perforaciones y Servicios IPS (México).

Tabla 27. Primera parte de Catálogo de barrenas de insertos usada para seleccionar diámetros de barrenas normadas.

| Diámetro de barrena (mm) | Diámetro de barrena (pulg) | Peso de barrena (kgf) |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 98.4                     | 3 ⅞                        | 3.8                   |
| 101.6                    | 4                          | 4.4                   |
| 114.3                    | 4 ½                        | 5.3                   |
| 120.7                    | 4 ¾                        | 9.6                   |
| 123.8                    | 4 ⅞                        | 9.7                   |
| 142.9                    | 5 ⅝                        | 16.0                  |
| 149.2                    | 5 ⅞                        | 17.0                  |
| 152.4                    | 6                          | 17.5                  |
| 155.6                    | 6 ⅝                        | 18.0                  |
| 158.8                    | 6 ¼                        | 18.0                  |
| 165.1                    | 6 ½                        | 20.0                  |
| 171.5                    | 6 ¾                        | 22.0                  |
| 190.5                    | 7 ½                        | 32.3                  |
| 193.7                    | 7 ⅝                        | 33.3                  |
| 200.0                    | 7 ⅞                        | 34.8                  |
| 212.7                    | 8 ⅝                        | 42.0                  |
| 215.9                    | 8 ½                        | 44.3                  |
| 219.1                    | 8 ⅞                        | 45.0                  |
| 222.3                    | 8 ¾                        | 46.0                  |
| 244.5                    | 9 ⅝                        | 62.0                  |

Fuente: Integradora de Perforaciones y Servicios (IPS). (s. f.). Catálogo de brocas [Catálogo PDF]

Tabla 28. Segunda parte de Catálogo de barrenas de insertos usada para seleccionar diámetros de barrenas normadas.

| Diámetro de barrena (mm) | Diámetro de barrena (pulg) | Peso de barrena (kgf) |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 250.8                    | 9 $\frac{5}{8}$            | 65                    |
| 269.9                    | 10 $\frac{5}{8}$           | 77                    |
| 279.4                    | 11                         | 80                    |
| 295.3                    | 11 $\frac{5}{8}$           | 101                   |
| 304.8                    | 12                         | 106                   |
| 311.2                    | 12 $\frac{1}{4}$           | 110                   |
| 349.3                    | 13 $\frac{3}{4}$           | 144                   |
| 374.7                    | 14 $\frac{3}{4}$           | 166                   |
| 381.0                    | 15                         | 182                   |
| 393.7                    | 15 $\frac{1}{2}$           | 190                   |
| 406.4                    | 16                         | 194                   |
| 444.5                    | 17 $\frac{1}{2}$           | 265                   |
| 508.0                    | 20                         | 340                   |
| 527.1                    | 20 $\frac{3}{4}$           | 406                   |
| 558.8                    | 22                         | 434                   |
| 584.2                    | 23                         | 459                   |
| 609.6                    | 24                         | 540                   |
| 660.4                    | 26                         | 560                   |

Fuente: Integradora de Perforaciones y Servicios (IPS). (s. f.). Catálogo de brocas [Catálogo PDF]

Tomando como base la tabla 27, se seleccionan los diámetros de las barrenas que están dentro de los rangos calculados en la tabla 26. Obteniendo la tabla 29.

Tabla 29. Selección de barrenas y tubería de revestimiento respectivas para cada etapa del pozo diseñado. Dimensiones en pulgadas.

| Etapa       | Diámetro seleccionado de barrena normada  | Diámetro de tubería de revestimiento normada |
|-------------|---|--|
| Estructural | 11 $\frac{5}{8}$  | 7 $\frac{5}{8}$                              |
| Superficial | 13 $\frac{3}{4}$  | 7  |
| Producción  | 10 $\frac{5}{8}$ , 9 $\frac{7}{8}$ , 9 $\frac{5}{8}$                                    | 6 $\frac{5}{8}$                              |
| Liner       | 7 $\frac{7}{8}$ , 7 $\frac{5}{8}$ , 7 $\frac{1}{2}$ , 6 $\frac{3}{4}$ , 6 $\frac{1}{2}$ | 5 $\frac{1}{2}$                              |

Como se puede observar, en las etapas de producción y liner se pueden seleccionar diferentes diámetros de barrenas, se han puesto todas las opciones para que el diseñador elija según su criterio cuál es el que más le parezca. Acá se elegirá uno al azar para ejemplificar el problema, resultando en la tabla 30.

Tabla 30. Valores calculados de WOB para cada barrena seleccionada.

| Etapa       | Diámetro seleccionado de barrena normada | WOB (lb-pulg) |
|-------------|--|---------------|
| Estructural | 11 5/8                                   | 51150         |
| Superficial | 13 3/4                                   | 60500         |
| Producción  | 10 5/8                                   | 46750         |
| Liner       | 7 7/8                                    | 34650         |

### 2.2.3. Grado De Tubería De Revestimiento

Para saber cuál de ellos elegir se debe de analizar el grado apropiado para cada etapa según sus condiciones. Ya que el pozo estará bajo alto contenido de azufre necesita que el casing resista ante esas condiciones. Los grados normados según la API para cada acero están descritos en la tabla 31.

Tabla 31. Materiales de tuberías y grados de acero

| Grado API | Esfuerzo de fluencia, psi (min.) | Esfuerzo de fluencia, psi (máx.) | Resistencia última a la tracción, psi | Elongación mínima (%) |
|-----------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| H-40      | 40,000                           | 80,000                           | 60,000                                | 29.5                  |
| J-55      | 55,000                           | 80,000                           | 75,000                                | 24.0                  |
| K-55      | 55,000                           | 80,000                           | 95,000                                | 19.5                  |
| N-80      | 80,000                           | 110,000                          | 100,000                               | 18.5                  |
| L-80      | 80,000                           | 95,000                           | 95,000                                | 19.5                  |
| C-90      | 90,000                           | 105,000                          | 100,000                               | 18.0                  |
| C-95      | 95,000                           | 110,000                          | 105,000                               | 18.5                  |
| T-95      | 95,000                           | 110,000                          | 105,000                               | 18.0                  |
| P-110     | 110,000                          | 140,000                          | 125,000                               | 15.0                  |
| Q-125     | 125,000                          | 150,000                          | 135,000                               | 18.0                  |

Según esta tabla, los aceros de C-90 al Q-125 son aptos para la etapa de producción y liner porque poseen propiedades altas de resistencia y los azufres fragilizan este acero por lo que se puede elegir entre este rango. A pesar que estas dos etapas son las que están más cerca del reservorio, en este caso que se tiene alto contenido de azufre también se les debe de instalar aceros que

resistan a este en las etapas más lejanas como lo son la estructural y superficial, pero del orden de entre N-80 a C-90 ya que no estarán bajo grandes cantidades de azufre como las que están cerca del reservorio. Se puede seleccionar las siguientes distribuciones de aceros, resultando la tabla 32.

*Tabla 32. Selección de aceros para materiales de la tubería de revestimiento respectiva para cada etapa del pozo diseñado.*

| <b>Etapa</b> | <b>Grado de acero de casing</b> |
|--------------|---------------------------------|
| Estructural  | N-80                            |
| Superficial  | L-80                            |
| Producción   | P-110                           |
| Liner        | Q-125                           |

#### **2.2.4. Longitud De Etapas**

Para definir la longitud que tendrá cada una de las etapas se basará en la tabla 33 de valores comúnmente utilizados en el país.

*Tabla 33. Longitud por etapa en pozos geotérmico*

| <b>Etapa</b> | <b>Longitud por etapa (m)</b> | <b>Consideraciones adicionales</b>   |
|--------------|-------------------------------|--|
| Estructural  | 1° 100 a 150                  |  |
| Superficial  | 2° 500 a 650                  |  |
| Intermedia   | 3° 450 a 800 o 1000           |  |
| Producción   | 4° 700 a 900                  | El límite máximo para esta etapa es por lo general para pozos de 4 etapas. |
| Liner        | 5° $\geq 800$                 | Hasta completar la profundidad del pozo.                                   |

Donde se puede elegir un rango de longitudes para cada etapa con el único requisito que cumpla con la longitud total del pozo de 1500 metros desde la superficie hasta el reservorio, sin embargo, también se debe de fijar el valor de 800 metros para el liner como longitud mínima que debe de poseer esta etapa

para mantener la seguridad que sí alcance el interior del reservorio, siendo esta una de las etapas más críticas en el pozo. En este caso se decide elegir los siguientes valores de longitudes (Tabla 34), pero puede variar a criterio del diseñador.

*Tabla 34. Selección de longitudes por etapas para el pozo diseñado.*

| <b>Etapas</b> | <b>Longitud por etapa (m)</b> |
|---------------|-------------------------------|
| Estructural   | 90                            |
| Superficial   | 250                           |
| Producción    | 360                           |
| Liner         | 800                           |

Como se puede observar, los valores difieren con los del rango de la tabla anteriormente anexada, debido a que la altura de 1500 metros sobrepasa la suma de las longitudes mínimas a escoger en estos rangos, por lo que se optó por disminuir levemente las longitudes más grandes para seguir en valores cercanos.

### **2.2.5. Cantidad De Tuberías De Revestimiento**

Teniendo la premisa de que cada tubería que se debe de instalar debe ser de 10 metros, se puede obtener el total de tuberías a utilizar en toda la obra. Sus resultados se enlistan en la tabla 35.

*Tabla 35. Cantidad de tuberías calculadas para el pozo diseñado.*

| <b>Etapas</b> | <b>Número de tuberías</b> |
|---------------|---------------------------|
| Estructural   | 9                         |
| Superficial   | 25                        |
| Producción    | 36                        |
| Liner         | 80                        |

### 2.2.6. Fluido De Perforación

Deben calcularse los volúmenes de fluido que se requerirán durante la perforación de cada etapa. Este volumen es el resultado de la suma de tres tipos de fluidos en el proceso de perforación.

Ecuación 26: volumen de fluido por etapa,

$$\text{Volumen de fluido por etapa} = V_{ap} + V_{perd} + V_{tans} \quad (26)$$

Donde todos los términos están en metros cúbicos y corresponden a:

$V_{ap}$  es el volumen del agujero perforado.

$V_{perd}$  es el volumen de pérdidas de lodos.

$V_{tans}$  es el volumen de almacenamiento en la superficie

-Volumen del agujero perforado: Su origen proviene gracias al trabajo que hay que realizar para cavar el agujero. Es necesario calcularlo con la siguiente ecuación.

Ecuación 27: volumen cilíndrico por cada etapa de perforación.

$$V_{ap} = (5.07 \times 10^{-4}) * D_{int}^2 * L_{etapa} \quad (27)$$

Donde:

$V_{ap}$ : volumen en m<sup>3</sup> del cilindro formado por etapa.

$D_{int}$ : Diámetro en pulgadas del agujero (barrena) por etapa.

$L_{etapa}$ : Longitud de etapa en metros.

-Volumen de pérdidas: Se produce por la permeabilidad de las paredes del agujero. Por lo general, el rango normal que se pierde es de 1.5 m<sup>3</sup> de lodo por cada metro cúbico perforado. Además, por los derrumbes de paredes se pueden

representar por un 20% del volumen del agujero, resumiendo en la ecuación:

Ecuación 28: cálculo de volumen de pérdidas de fluido de perforación.

$$V_{perd} = V_{ap} * 1.7 \quad (28)$$

Donde  $V_{ap}$  es el volumen del agujero perforado.

-Volumen de almacenamiento en superficie: Debe considerarse que el volumen y cantidad de tanques que se tengan disponibles en superficie tiene capacidades que varían de acuerdo al uso (comúnmente tres tanques de 30 m<sup>3</sup> c/u).

$$V_{tans} = 90 \text{ m}^3$$

Con todo esto en mente, se puede realizar el cálculo de estos lodos de perforación, los resultados se visualizan en la tabla 36 para valores normados y 37 para nacionales.

Tabla 36. Cálculos para volumen de fluido de perforación para pozo diseñado con base a valores normados.

| Etapa        | Longitud (m) | Diám de barrena normada (pulg) | $V_{ap}$ (m <sup>3</sup> ) | $V_{perd}$ (m <sup>3</sup> ) | $V_{tans}$ (m <sup>3</sup> ) | Total por etapa (m <sup>3</sup> ) |
|--------------|--------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Estructural  | 90           | 11 5/8                         | 6.1                        | 10.4                         | 90                           | 106.6                             |
| Superficial  | 250          | 13 3/4                         | 23.9                       | 40.7                         | 90                           | 154.7                             |
| Producción   | 360          | 10 5/8                         | 20.6                       | 35.0                         | 90                           | 145.6                             |
| Liner        | 800          | 7 7/8                          | 25.1                       | 42.7                         | 90                           | 157.9                             |
| <b>Total</b> |              |                                |                            |                              |                              | 564.9                             |

Tabla 37. Cálculos para volumen de fluido de perforación para pozo diseñado con base datos nacionales.

| Etapa        | Longitud (m) | Diám de barrena nacional (pulg) | $V_{ap}$ (m <sup>3</sup> ) | $V_{perd}$ (m <sup>3</sup> ) | $V_{tans}$ (m <sup>3</sup> ) | Total por etapa (m <sup>3</sup> ) |
|--------------|--------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Estructural  | 90           | 40                              | 73.0                       | 124.1                        | 90                           | 287.1                             |
| Superficial  | 250          | 26                              | 85.6                       | 145.6                        | 90                           | 321.3                             |
| Producción   | 360          | 12 1/4                          | 27.4                       | 46.5                         | 90                           | 163.9                             |
| Liner        | 800          | 8 1/2                           | 29.3                       | 49.8                         | 90                           | 169.1                             |
| <b>Total</b> |              |                                 |                            |                              |                              | 941.5                             |

### 2.2.7. Cementación

El volumen de la lechada se obtiene del producto de la longitud y el volumen parcial anular de la etapa del pozo:

Ecuación 29: volumen parcial anular del pozo,

$$V_p = 0.5067(D_{anular}^2 - d_{anular}^2) \quad (29)$$

$D_{anular}$  y  $d_{anular}$  en pulgadas. El resultado será en  $l/m$  (esto para cada etapa).

Ecuación 30: cálculo de volumen de lechada.

$$V_L = V_p * L_{etapa} \quad (30)$$

Donde  $V_p$  es el volumen parcial anular del pozo.

Al resultado anterior se le suma un exceso del 100%. El resultado debe ser en BBL (barriles de lechada), pero en este caso será en litros.

$$1\text{BBL (US)} = 42 \text{ galones} = 159 \text{ l}$$

La tabla con los valores finales para los cálculos nacionales es la tabla 38 y la respectiva para los valores de los cálculos normados es la tabla 39.

Tabla 38. Cálculos para volumen de lechada para pozo diseñado con base a valores convencionales de El Salvador.

| Etapa       | Diámetro de barrena nacional (pulg) | Diámetro de tubería de revestimiento nacional (pulg) | Longitud (m) | $V_p$ (l/m) | $V_L$ (l) | $V_L$ 100% exceso (l) |
|-------------|-------------------------------------|--|--------------|-------------|-----------|-----------------------|
| Estructural | 40                                  | 36   | 90           | 154.0       | 13 863.3  | 27 726.6              |
| Superficial | 26                                  | 20   | 250          | 139.8       | 34 962.3  | 69 924.6              |
| Producción  | 12 ¼                                | 9 ⅝  | 360          | 29.1        | 10 474.4  | 20 948.9              |
| Liner       | 8 ½                                 | 7  | 800          | 11.8        | 9 424.6   | 18 849.2              |
|             |                                     |  |              |             | Total L   | 137 450.0             |
|             |                                     |  |              |             | Total BBL | 865.0                 |

Tabla 39. Cálculos para volumen de lechada para pozo diseñado con base datos normados.

| Etapa       | Diámetro de barrena normados (pulg) | Diámetro de tubería de revestimiento normado (pulg) | Longitud (m) | $V_p$ (l/m) | $V_L$ (l) | $V_L$ 100% exceso (l) |
|-------------|-------------------------------------|---|--------------|-------------|-----------|-----------------------|
| Estructural | 11 $\frac{5}{8}$                    | 7 $\frac{5}{8}$                                     | 90           | 39          | 3 511.4   | 7 022.9               |
| Superficial | 13 $\frac{3}{4}$                    | 7   | 250          | 71          | 17 742.4  | 35 484.8              |
| Producción  | 10 $\frac{5}{8}$                    | 6 $\frac{5}{8}$                                     | 360          | 35          | 12 586.4  | 25 172.9              |
| Liner       | 7 $\frac{7}{8}$                     | 5 $\frac{1}{2}$                                     | 800          | 16          | 12 876.5  | 25 753.0              |
| Total L     |                                     |   |              |             |           | 93 434.0              |
| Total BBL   |                                     |   |              |             |           | 588.0                 |

Balance de masas:

Para esta parte de la selección de la cantidad de materiales para la lechada se hace uso de la siguiente tabla (Tabla 40).

Tabla 40. Valores de cálculo de balance de masas para cementación.

| Material    | % P/P  | kg/saco H | Densidad (kg/ l) | $l/saco$<br>H | % P/P decimal |
|-------------|--------|-----------|------------------|---------------|---------------|
| Cemento H   | 100.00 | 42.600    | 3.140            | 13.570        | 1.000         |
| Sílica      | 35.00  | 14.910    | 2.630            | 5.670         | 0.350         |
| Dispersante | 0.20   | 0.0852    | 1.300            | 0.065         | 0.002         |
| Agua        |        |           | 1.000            |               |               |

También se tomarán en cuenta las siguientes constantes:

-Presentación de sacos de Cemento H: 94 *lb/sac* lo cual es equivalente a 42.6377 *kg/sac* para la fecha de la investigación.

-Presentación de sacos de Sílica y Dispersante: 50 *lb/sac* equivalentes a 22.6796 *kg/sac* para la fecha de la investigación.

-La densidad de la lechada es:  $\rho_{Lech} = 1.89 \text{ kg/l}$

Respectivamente se tomará el valor del volumen de lechada, tanto para la selección por medio del proceso en base a valores convencionales de El Salvador como de datos normados.

Para obtener el valor de “x” se toma en cuenta que el valor de la densidad de la lechada viene dado por la suma de las masas dividido por los volúmenes, y puesto que “x” pertenece tanto a masas como volúmenes, ese valor se despeja obteniendo como resultado el siguiente arreglo en la ecuación:

Ecuación 31: cálculo de la densidad de la lechada

$$\rho_{lech} = \frac{m_L/sac}{V_L/sac} = \frac{m_{cemH} + m_{Sil} + m_{dis} + x}{V_{cemH} + V_{Sil} + V_{dis} + x} = \frac{\sum m + x}{\sum V + x} \quad (31)$$

Donde:

$m$ : es la masa de cemento H, silica y dispersantes respectivamente.

$V$ : corresponde al volumen de cemento H, silica y dispersantes.

Ecuación 32: despeje de x en la ecuación (30).

$$x = \frac{\sum m - (\sum V * \rho_{lech})}{(\rho_{lech} - 1)} \quad (32)$$

Donde:

$\rho_{lech}$ : densidad de lechada

Con esto se obtienen los datos principales para las siguientes partes del proceso, donde se tiene:

Ecuación 33: cálculo del volumen de lechada por saco.

$$V_L/sac = \sum V + x \quad (33)$$

Donde:

$V_L/sac$ : corresponde al valor de volumen por cada saco.

Ecuación 34: cálculo de número de sacos de cemento H a utilizar.

$$N^{\circ}_{sacH} = \frac{V_L}{V_L/sac} \quad (34)$$

Donde:

$N^{\circ}_{sacH}$ : el numero de sacos de cemento H.

Y la masa base tomando en cuenta la presentación de 94 *lb/sac* para cemento tipo H, se obtiene:

Ecuación 35: cálculo de masa base.

$$m_{base} = N^{\circ}_{sacH}(Presentación) \quad (35)$$

Donde:

$m_{base}$ : la masa base para el cálculo de la masa de fluido para cementación.

Para la sílica y los dispersantes se realizará el mismo proceso de cálculo de números de sacos a utilizar, tomando en cuenta que las presentaciones de los sacos para estos aditivos viene en presentaciones de: 50 *lb/sac* y el %P/P no es de "1" como en el cemento, con estas consideraciones las ecuaciones a utilizar para este proceso son:

Ecuación 36: número de sacos de sílica.

$$N^{\circ}_{sacSi} = \frac{m_{base}(\%P/P)}{Presentación} \quad (36)$$

Donde:

$N^{\circ}_{sacSi}$ : numero de sacos de silica.

(%P/P): porcentaje peso peso.

Ecuación 37: número de sacos de dispersantes.

$$N^{\circ}_{sacDis} = \frac{m_{base}(\%P/P)}{Presentación} \quad (37)$$

Donde:

$N^{\circ}_{sacDis}$ : numero de sacos de dispersante.

Ecuación 38: volumen de agua para la mezcla.

$$V_{agua} = x * N^{\circ}_{sacH} \quad (38)$$

Donde:

$x$ : masa del agua

$V_{agua}$ : volumen del agua

Este valor de volumen de agua obtenido en la ecuación (38) es recomendable pasarlo a BBL. Así se obtienen las tablas 41 y 42 para el diseño, tanto con base a valores convencionales de El Salvador como para los datos normados:

*Tabla 41. Resultados de balance de masa y materiales requeridos para cementación acorde a valores convencionales de El Salvador*

| <b>Diseño con base a valores convencionales de El Salvador</b> |          |                                   |
|--|----------|-----------------------------------|
| Variable   | Valor    | Unidad                            |
| $V_L$  | 137450.0 | <i>l</i>                          |
| $\rho_L$   | 1.9      | <i>kg/l</i>                       |
| $\Sigma m$   | 57.6     | <i>kg/saco H</i>                  |
| $\Sigma V$   | 19.3     | <i>l/saco H</i>                   |
| $x$  | 23.7     | <i>(kg/saco H) de Agua</i>        |
| $V_L / sac$  | 43.0     | <i>l/saco H</i>                   |
| $N^{\circ} sac H$  | 3195     | <i>Sacos (Unidad)<sup>3</sup></i> |
| $m_{base}$   | 300330   | <i>lb</i>                         |
| $N^{\circ} sac sil$  | 2103     | <i>Sacos (Unidad)<sup>4</sup></i> |
| $N^{\circ} sac dis$  | 13       | <i>Sacos (Unidad)</i>             |
| $V_{agua}$   | 75778.0  | <i>l</i>                          |
| $V_{agua}$   | 477      | <i>BBL</i>                        |

<sup>3</sup> La presentación de los sacos de cemento H utilizados se encuentra en la página 84

<sup>4</sup> La presentación de sacos de aditivos tomadas en cuenta para esta investigación se describe en la página 85

Tabla 42. Resultados de balance de masa y materiales requeridos para cementación acorde a valores normados.

| <b>Diseño con base a valores de la selección normada por el Instituto Americano de Petróleo (API)</b> |         |                            |
|---|---------|----------------------------|
| Variable  | Valor   | Unidad                     |
| $V_L$   | 93434.0 | <i>l</i>                   |
| $\rho_L$  | 1.9     | <i>kg/l</i>                |
| $\Sigma m$  | 57.6    | <i>kg/saco H</i>           |
| $\Sigma V$  | 19.3    | <i>l/saco H</i>            |
| $x$   | 23.7    | <i>(kg/saco H) de Agua</i> |
| $V_L / sac$   | 43.0    | <i>l/saco H</i>            |
| $N^\circ sac H$   | 2172    | <i>Sacos (Unidad)</i>      |
| $m_{base}$  | 204168  | <i>lb</i>                  |
| $N^\circ sac sil$   | 1430    | <i>Sacos (Unidad)</i>      |
| $N^\circ sac dis$   | 9       | <i>Sacos (Unidad)</i>      |
| $V_{agua}$  | 51514.8 | <i>l</i>                   |
| $V_{agua}$  | 324     | <i>BBL</i>                 |

Cabe aclarar que los datos y resultados de estas dos tablas están tomados en base al resultado total de lechada utilizada en la cementación, para todas las fases del pozo.

### **Capítulo 3. Desarrollo del software educativo**

Este capítulo detalla los aspectos clave en el proceso de desarrollo del software, desde la elección del entorno de programación hasta la implementación de un sistema de base de datos para la gestión de información.

#### **3.1 Selección del lenguaje de programación**

La selección del entorno de programación es un proceso fundamentado en las necesidades del software y en los lenguajes disponibles ya conocidos y con experiencia previa, que se consideran más adecuados para cumplir con los objetivos del proyecto.

Inicialmente se plantea utilizar Java y Python como opciones viables, ya que ambos permiten desarrollar aplicaciones multiplataforma y la generación de ejecutables (.exe) con una apariencia profesional para aplicaciones de escritorio, sin embargo, cada lenguaje presenta ventajas y desventajas, las cuales se detallan a continuación:

Java: Es un lenguaje robusto y ampliamente utilizado en aplicaciones de gran escala y multiplataforma. Su ejecución de archivos .exe es profesional, lo que representa un punto a favor. Sin embargo, el desarrollo en Java es más complejo y requiere mayor tiempo de programación y recursos, lo cual es un inconveniente para este proyecto.

Python: Es un lenguaje de programación muy intuitivo y sencillo de aprender, lo cual facilita el desarrollo rápido y eficiente de aplicaciones. Sin embargo, Python tiene limitaciones en la creación de interfaces de usuario complejas, o sea su frontend es mucho más sencillo y más complicado de programar comparado con lenguajes de programación ya dedicados para la creación de aplicaciones

como lo es Java. Otro punto a tomar en cuenta es que también está más limitado en la generación de ejecutables de aspecto profesional.

JavaScript: Lenguaje inicialmente descartado para este proyecto, ya que tradicionalmente se ha enfocado más en el desarrollo web; sin embargo, con herramientas como Electron, que es una herramienta que facilita la creación de aplicaciones de escritorio usando tecnologías web (JavaScript, HTML y CSS), hace posible que la aplicación sea multiplataforma y que se pueda generar su archivo ejecutable (.exe) con una apariencia profesional, esto ya que al estar diseñado para el desarrollo web, JavaScript tiene una amplia gama de librerías y herramientas para la creación de interfaces intuitivas y visualmente atractivas, lo cual aporta significativamente a la experiencia de usuario, aunque su gran desventaja es su mayor complejidad para utilizar bases de datos para sus procesos.

Debido a estas características, finalmente se decidió optar por JavaScript como lenguaje principal, ya que permite el desarrollo tanto del frontend como del backend (cerebro del programa) en un mismo lenguaje, y es compatible con herramientas como Electron para generar archivos ejecutables con una apariencia profesional, aunque debido a la complejidad en la gestión de bases de datos locales se decidió utilizar JSON's y arrays para almacenar datos localmente y simplificar el proceso.

Así, el entorno de programación principal del proyecto fue establecido en JavaScript, utilizando Visual Studio Code como herramientas de desarrollo con extensiones de react y tauri para el diseño de la aplicación.

## **3.2 Conceptualización y diseño de la herramienta**

La conceptualización y diseño abarcan tanto la estructura de la interfaz (frontend) como la lógica interna de la aplicación (backend), por lo tanto, es fundamental establecer ambos aspectos de manera que se integren bien dentro de la aplicación.

Frontend (Interfaz de usuario): El frontend se refiere a la parte visual y de interacción directa que los usuarios tendrán con el software, aquí, JavaScript desempeña un papel clave, permitiendo la creación de una interfaz gráfica que sea intuitiva y atractiva, mediante el uso de librerías y tecnologías como HTML y CSS, se desarrollará una experiencia de usuario amigable, que facilite la navegación entre las opciones y funcionalidades del software.

Backend (Lógica y procesamiento): El backend es el núcleo de la aplicación, donde se procesan y gestionan los datos y la lógica necesaria para que el software funcione correctamente. Al ser una herramienta educativa, se necesita eliminar la dependencia de servidores o bases de datos externas, permitiendo que el sistema funcione de manera autónoma y sin conexión a Internet, realizando los cálculos de las operaciones para el diseño de los pozos y otros parámetros para el funcionamiento adecuado del frontend.

### **3.2.1 Integración de una base de datos**

Para el desarrollo del software, se identificó la necesidad de organizar y gestionar datos de manera estructurada, lo cual permitiría almacenar y recuperar información de manera eficiente, en un principio, se consideraron distintas opciones de bases de datos, con el objetivo de encontrar una solución que fuera efectiva y se ajustara a las características específicas de la aplicación.

La base de datos desempeña un papel importante en el software, ya que:

- I. Facilita la organización y almacenamiento de datos esenciales que el usuario necesitará para diseñar los pozos geotérmicos.
- II. Permite un acceso rápido a información predefinida, como configuraciones de pozos, tablas de datos técnicos y parámetros de diseño.
- III. Brinda la posibilidad de gestionar y actualizar datos de forma estructurada, simplificando el flujo de trabajo y optimizando la experiencia del usuario.

### **3.2.2 Tipos y elección de bases de datos**

Durante el desarrollo, se evaluaron diversos tipos de bases de datos, considerando tanto opciones de software libre como aquellas que ofrecieran soporte multiplataforma, facilidad de uso y un buen rendimiento. Entre las opciones que se analizaron, se encuentran:

- I. Oracle: Es una de las bases de datos más reconocidas a nivel empresarial por su escalabilidad, robustez y alto rendimiento. Sin embargo, Oracle requiere una licencia de pago, lo cual se considera un inconveniente en este caso, ya que el objetivo es que el software funcione de manera autónoma y sin incurrir en costos adicionales, debido a esto, Oracle fue descartado como opción viable para este proyecto.
- II. PostgreSQL: Esta es una base de datos de código abierto que ofrece alta escalabilidad y rendimiento, siendo ideal para proyectos de gran envergadura.  
PostgreSQL permite la gestión avanzada de datos y es compatible con

la mayoría de sistemas operativos, a pesar de sus beneficios, su complejidad y enfoque en proyectos de gran escala la hacen una opción poco práctica para un software educativo de uso local, además, su instalación y configuración requieren conocimientos técnicos avanzados, por lo que también fue descartada.

III. MySQL: Similar a PostgreSQL, MySQL es una opción de código abierto que ofrece robustez y estabilidad, es ampliamente utilizada en entornos empresariales y permite la gestión de datos en aplicaciones de mediana a gran escala, sin embargo, requiere la configuración de un servidor o una conexión de red estable, lo cual representa una desventaja en este caso, ya que el objetivo es que el software funcione sin depender de un servidor externo.

IV. SQLite: A diferencia de las opciones anteriores, SQLite es una base de datos ligera y de fácil implementación que se ejecuta de manera local, no requiere configuración de servidor, lo cual la hace ideal para aplicaciones de escritorio que necesitan gestionar datos de forma sencilla y sin conexión a Internet.

SQLite permite almacenar y organizar datos de manera estructurada en un archivo local, lo cual reduce los costos de implementación y hace que sea compatible con el enfoque educativo del software, por estas razones, SQLite se consideró la opción más viable para el proyecto.

Decisión final sobre la base de datos: Aunque SQLite fue seleccionada inicialmente por sus ventajas de uso local y su facilidad de integración en aplicaciones de escritorio, se presentaron dificultades en la integración de SQLite con el entorno JavaScript para la gestión de los datos dentro del software, dado

que el principal objetivo del software es mantener la simplicidad y optimizar el flujo de trabajo, finalmente se decidió crear estructuras de datos utilizando JSON's en JavaScript para almacenar la información y simular el funcionamiento de una base de datos local.

Este enfoque permite almacenar las tablas y los datos necesarios en un formato ligero y accesible, sin depender de configuraciones adicionales o de un servidor externo, aunque los JSON no proporcionan la misma capacidad de gestión avanzada que una base de datos relacional, son suficientes para cubrir las necesidades del software, facilitando la accesibilidad y filtración de los datos necesarios para el diseño de pozos geotérmicos.

### **3.2.3 Diagrama de flujo del funcionamiento de la aplicación**

El programa comenzará funcionando con una secuencia que ayudará a realizar el proceso de selección de las dimensiones de los pozos y algunas otras recomendaciones necesarias en dicho proceso.

Todo este proceso está descrito por medio de diagramas de flujo, los cuales facilitan la comprensión del funcionamiento del programa:

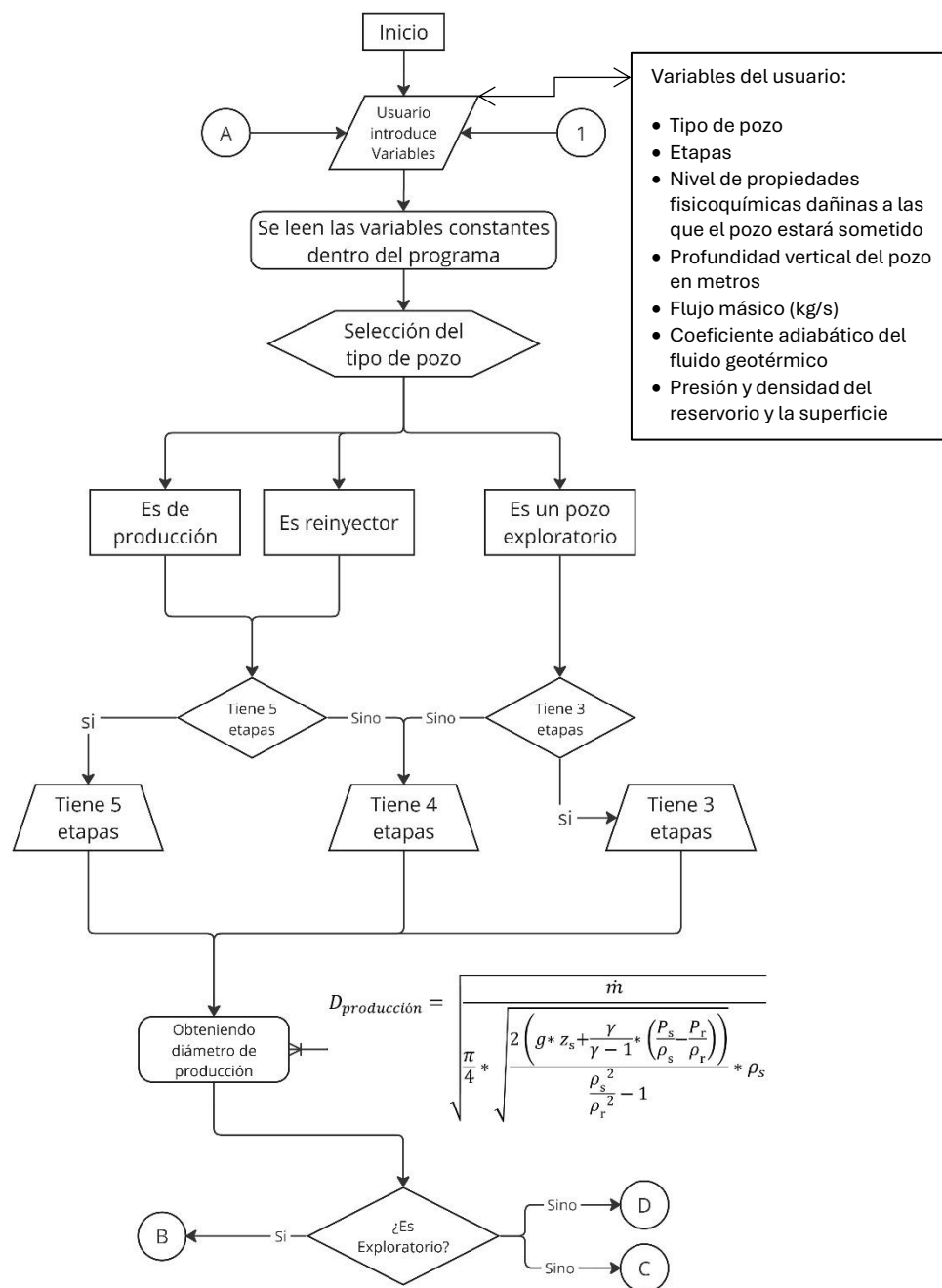


Figura 24. Diagrama de flujo de la solución a programar

Durante el inicio del proceso (Figura 24), el programa recibirá datos ingresados por el usuario entre ellos se encuentran la profundidad del pozo, cantidad de

etapas del pozo, presión y densidad de la superficie y del reservorio, entre otros datos, y también leerá las constantes almacenadas como la gravedad, considerada como constante ya que a pesar de ser variable en diferentes partes del mundo en el país posee una diferencia estimada de apenas  $0.002 \text{ m/s}^2$  siendo despreciable en la mayoría de cálculos de diseño, también se ha colocado un switch para la elección del tipo de pozo, si es de producción, reinyección o si se trata de un pozo de exploración.

Posterior a esto se habilitarán dos opciones para cada uno de los casos, si es un pozo convencional se habilitarán las opciones de selección entre un pozo de 4 y 5 etapas, en cambio si se trata de un pozo exploratorio el usuario podrá seleccionar entre un pozo de 3 o de 4 etapas, esta información le servirá al programa para la toma de decisiones sobre los tipos de cálculos que se realizarán posteriormente, además de que habilitará, por ejemplo diferentes rangos y datos específicos para cada uno de estos pozos.

Realizada la selección por el usuario del tipo de pozo y la cantidad de etapas, el programa va a realizar su primer cálculo, el cual se trata del diámetro de producción, para cualquiera de los tipos de pozos. Posterior a ello se realiza la consulta sobre la elección del tipo de pozo del usuario la cual puede ser pozo exploratorio o convencional, de ser un pozo exploratorio, establecerá los parámetros para los cálculos correspondientes de dimensiones únicamente con el criterio nacional (Figura 25), de lo contrario si es un pozo convencional el programa realizará dos cálculos diferentes, con el diámetro que se ha calculado se verificará por medio del método nacional (Figura 26) como por el método normado (Figura 27) los parámetros para el pozo, dando paso a dos nuevas secciones del programa.

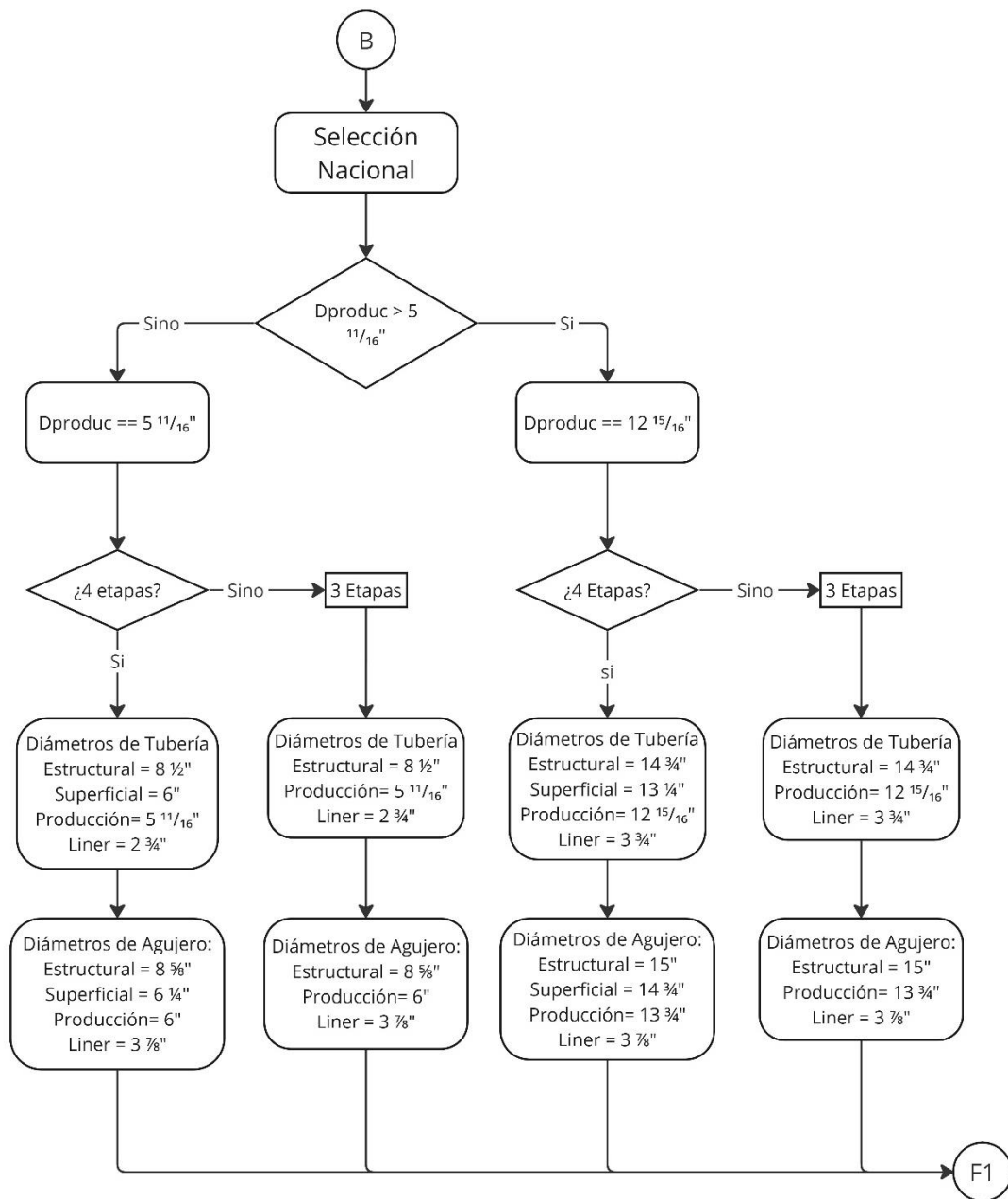


Figura 25. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

Al ser un pozo de tipo exploratorio (Figura 25) el programa identifica primeramente el diámetro que se ha calculado y evalúa si es grande o pequeño, además de la cantidad de etapas que tendrá el pozo según haya seleccionado el usuario, y acorde a estos dos parámetros en esta sección el programa va a asignar los diámetros tanto de las tuberías del pozo como de los agujeros y por

ende las barrenas para perforar dichos agujeros. Posterior a esto, el programa redirigirá el proceso al siguiente paso, el cual es la impresión de los datos obtenidos para el pozo en específico, mediante el diagrama mostrado en la figura 29.

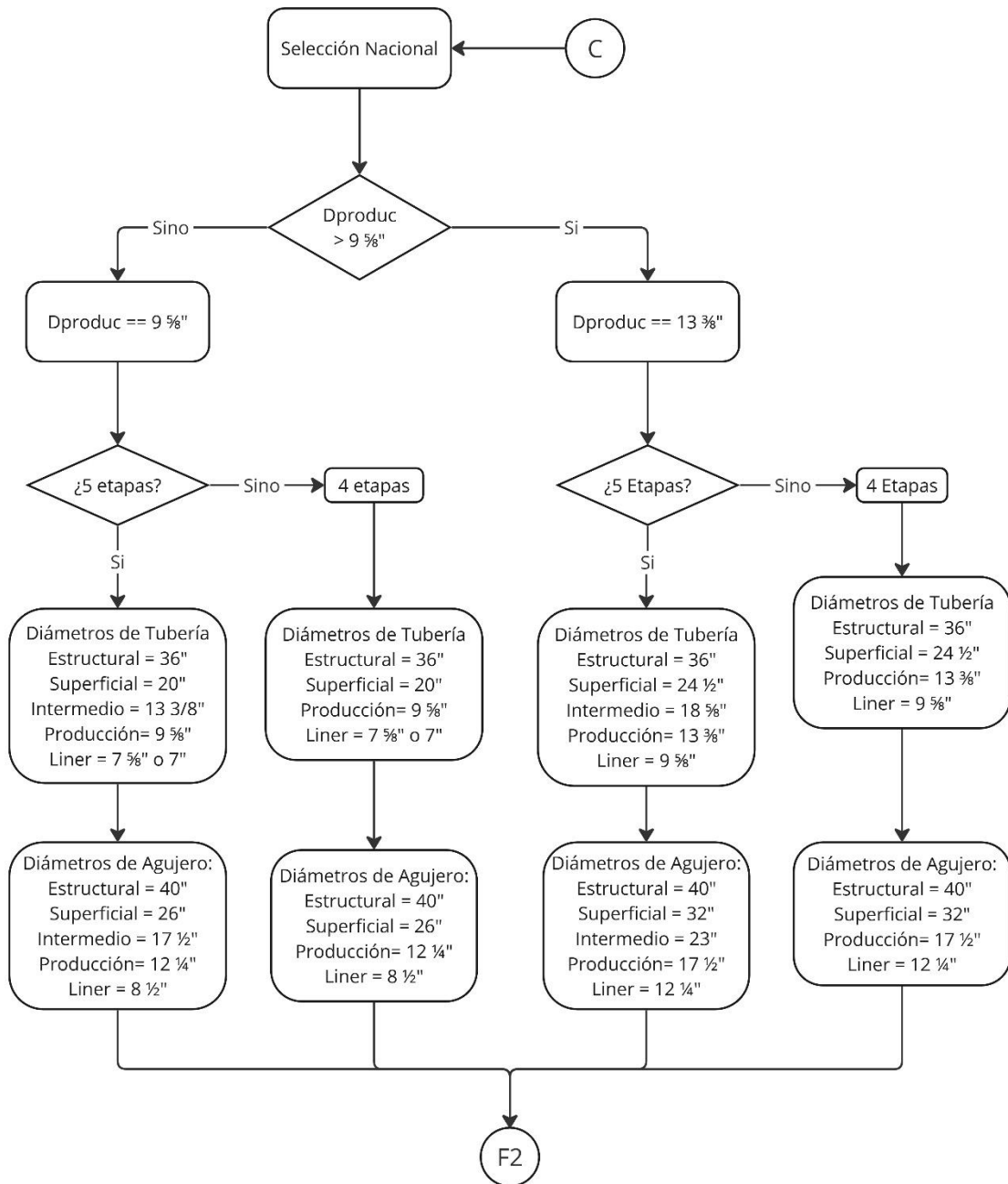


Figura 26. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

En el caso de ser un pozo convencional se separa en la selección nacional y la selección por normas, en el caso de la nacional (Figura 26), el flujo de acciones que toma el programa es corroborar el diámetro, para ver si es grande o pequeño, tal como en el pozo exploratorio, sin embargo, acá la validación de la cantidad de etapas esta entre 4 y 5 etapas y de acuerdo a lo que el usuario haya seleccionado asigna los valores para los diámetros por etapa y los diámetros de los agujeros.

Posterior a ello sigue con la siguiente etapa la cual es imprimir los datos obtenidos de las dimensiones en el diagrama de la figura 29.

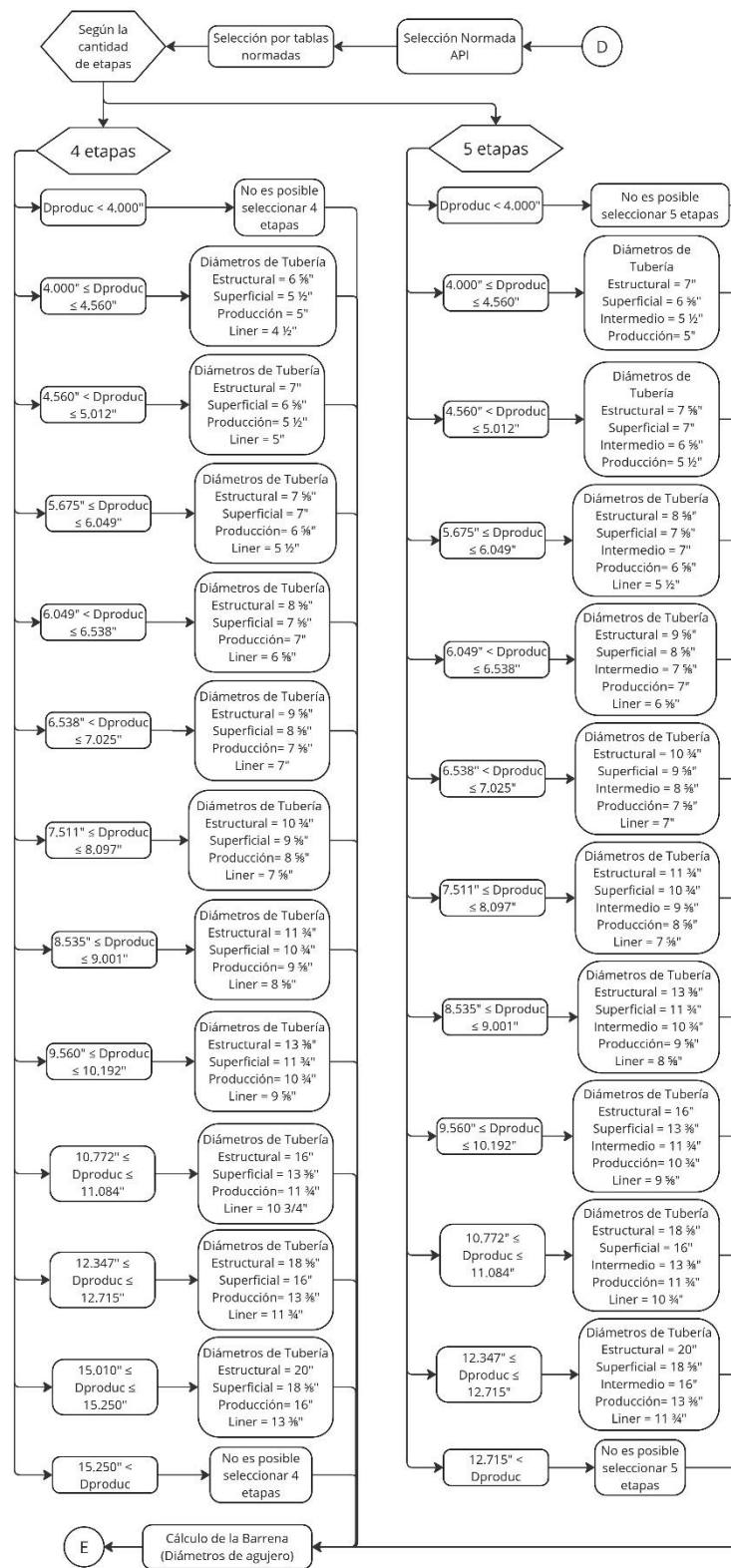


Figura 27. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

En el caso de ser un pozo convencional, también se realizará la selección de diámetros por medio de la selección normada API (Figura 27), para ello el programa tiene una cantidad de diámetros pre establecidos por la norma, ya sea de 4 o de 5 etapas, el programa comparará el diámetro obtenido anteriormente con los diámetros de la norma y seleccionará el próximo mayor, dejando así establecidos los diámetros de las tuberías, para posteriormente pasar a calcular los diámetros del agujero y las barrenas (Figura 28).

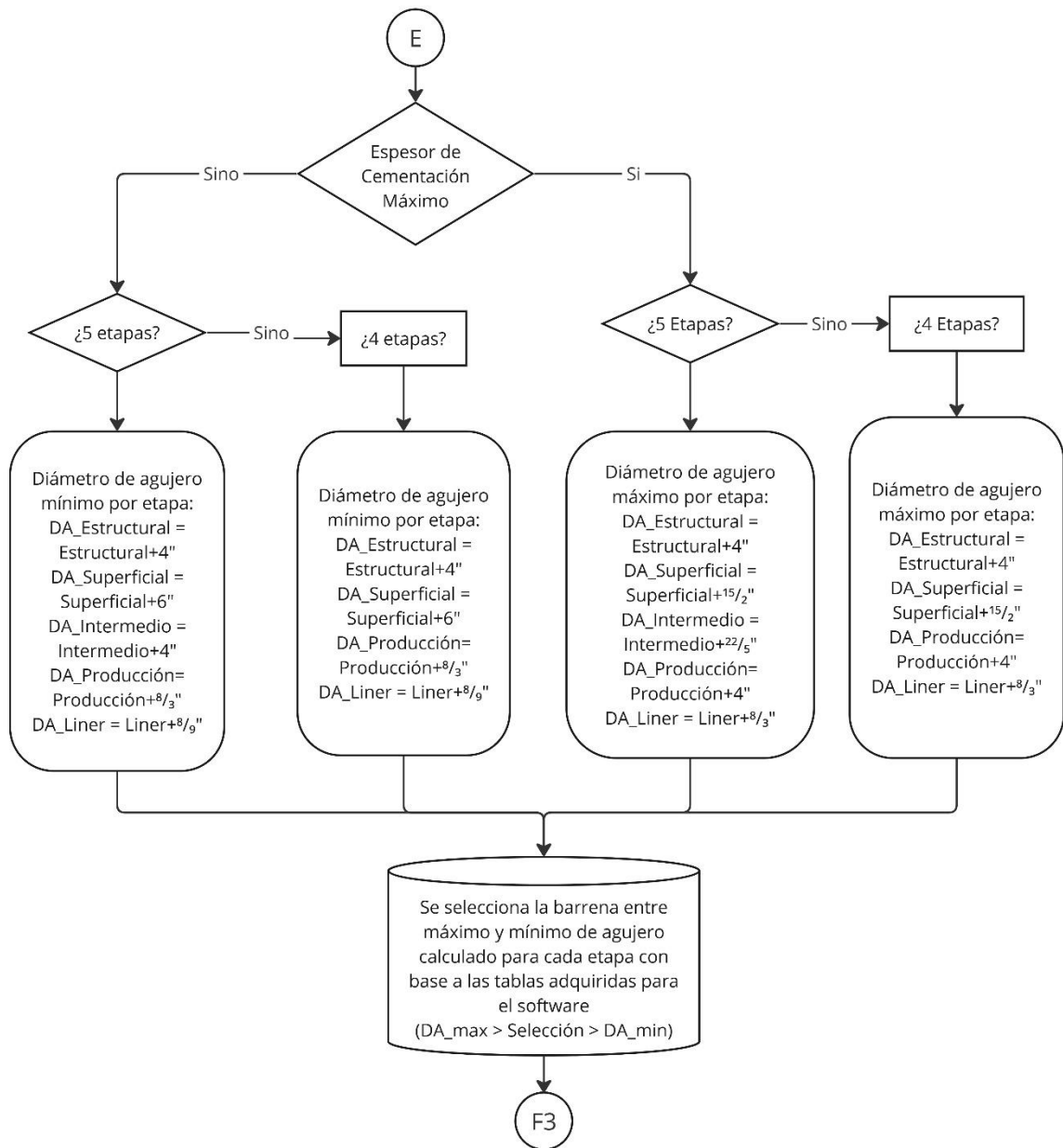


Figura 28. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

Tomando como referencia esta figura 28 para la selección del diámetro de la barrena y el agujero primero se seleccionan los espesores de cementación máximo y mínimos, y para ello se utilizará la fórmula correspondiente a cada una de las etapas tomando en cuenta los valores agregados máximos y mínimos de cementación.

A partir de ahí se seleccionan las barrenas comparando con una pequeña base de datos, seleccionando la barrena que esté dentro del rango y posteriormente pasar a la siguiente parte del proceso en la figura 29.

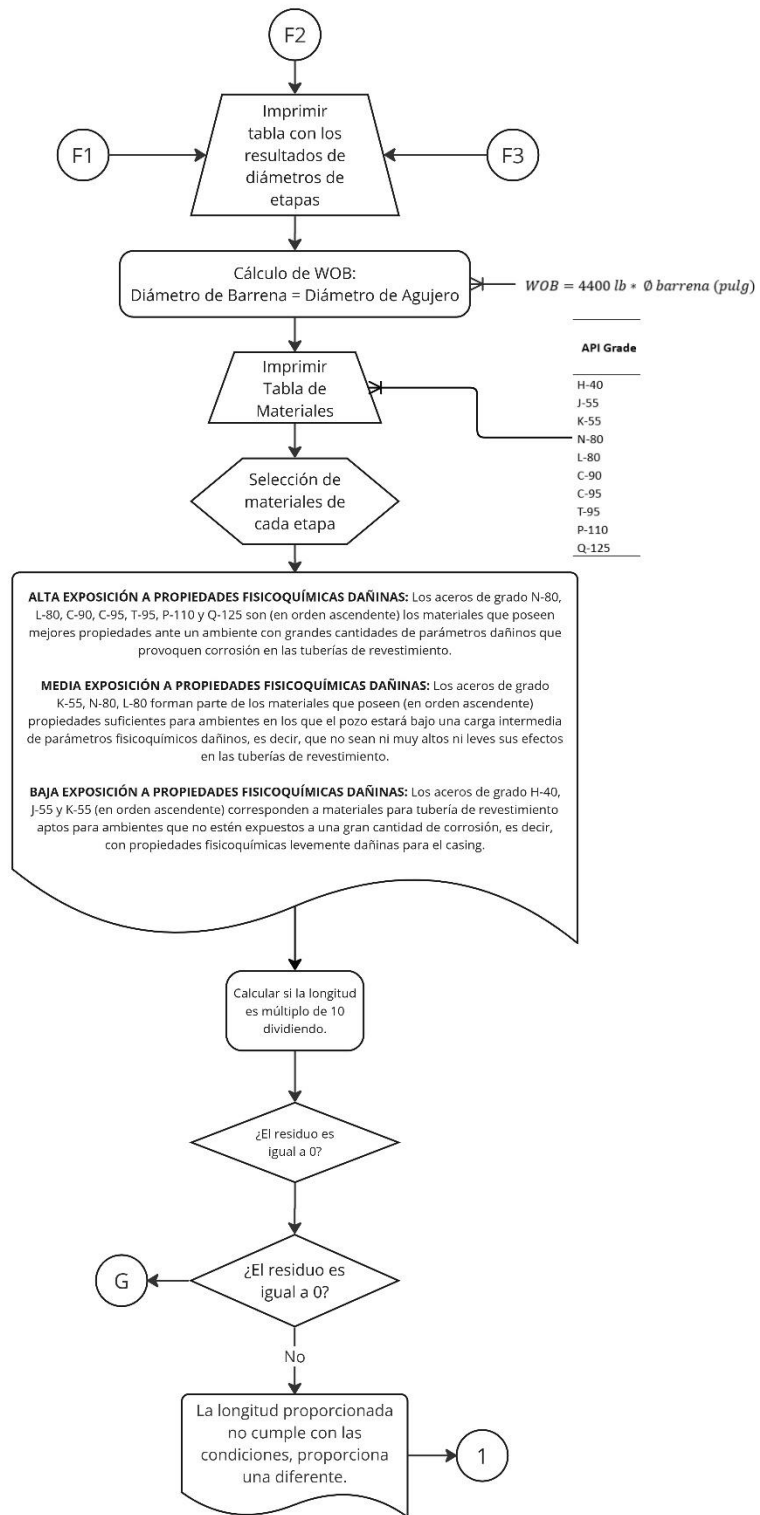


Figura 29. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

Una vez realizados los cálculos de los diámetros, tanto del pozo como del agujero, se pasa a imprimir los datos (Figura 29), si es exploratorio solamente lo calculado que es por medio de la selección nacional, mientras que si es de pozo tipo convencional se imprimen los datos tanto de selección nacional como por medio de la selección normada.

Con estos datos se calcula el WOB de cada una de las etapas y el programa también sugiere materiales para cada fase, dependiendo de la cantidad de contenido de azufre.

En esta parte (figura 29) el programa también pide al usuario introducir un valor de longitud máximo del pozo, siendo únicamente aceptos valores múltiplos de 10, esto para evitar en los siguientes pasos posibles errores.

Si el usuario proporciona valores adecuados, entonces pasa a la siguiente fase del programa descrito en el flujograma de la figura 30.

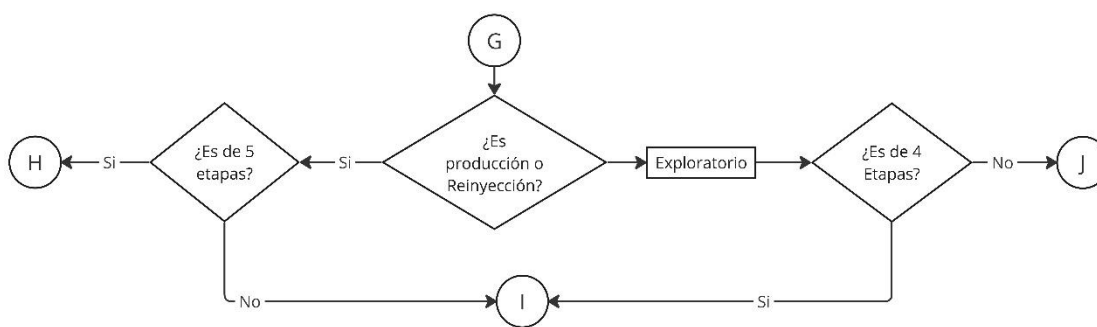


Figura 30. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

En esta fase el programa evalúa los datos obtenidos en el flujograma de la figura 29, para poder decidir a qué clase de algoritmo de selección de longitudes va a entrar, ya que cuenta con 3 algoritmos diferentes, uno por cada cantidad de etapas, siendo el primer caso (H) de la figura 31 un pozo de 5 etapas, el segundo caso (I) de la figura 32 un pozo de 4 etapas, el caso (J) en la figura 33 un pozo de 3 etapas, el orden de selección de estos casos viene por la prioridad secuencial del programa para tomar la decisión de que tipo de pozo se trata acorde a los datos introducidos por el usuario anteriormente, el programa decidirá cuál de los tres algoritmos tomará.

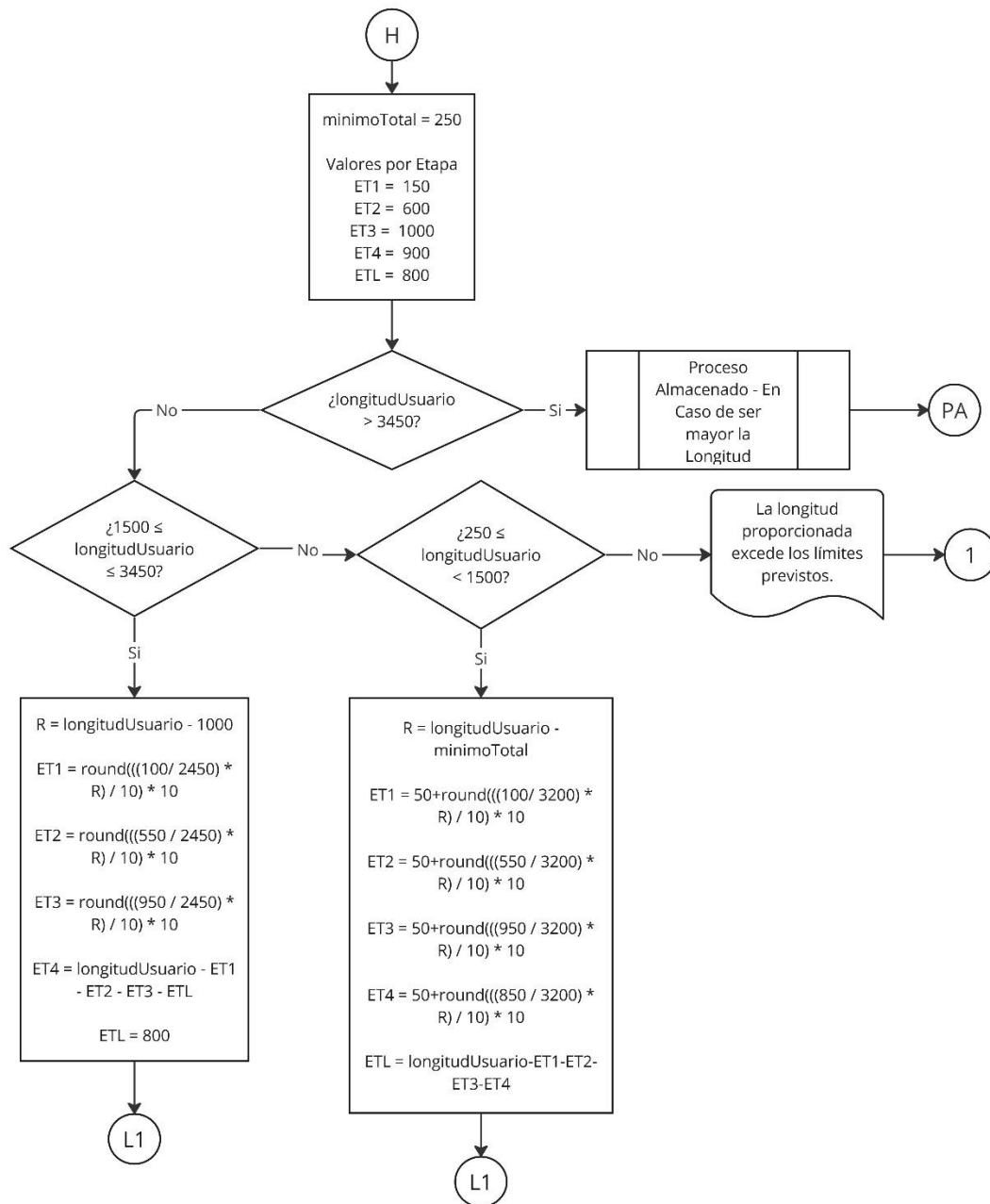


Figura 31. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

En el caso de ser un pozo de 5 etapas (Figura 31) el programa requiere dividir la profundidad total del pozo en todas las etapas funcionales de forma coherente, para asegurar la viabilidad estructural y operativa, se impone además un mínimo obligatorio para cada etapa, dicho mínimo es de 50 metros, dato que se repetirá en el razonamiento de los algoritmos de los otros tipos de pozo, esta restricción

se impone para garantizar que, incluso en pozos poco profundos, cada etapa tenga una cantidad mínima de material o espacio funcional.

Para la resolución de este problema se ha ideado un algoritmo de varios pasos, siendo el primero la definición de los valores mínimos e ideales, para ello se definen primero los valores ideales o “targets” para cada etapa, los cuales son:

- Etapa 1 (Estructural):  $T_1 = 150 m$
- Etapa 2 (Superficial):  $T_2 = 600 m$
- Etapa 3 (Intermedia):  $T_3 = 1000 m$
- Etapa 4 (Producción):  $T_4 = 900 m$
- Etapa 5 (Liner):  $T_5 = 800 m$

Estos valores provienen de parámetros y criticidad de diseño, la idea es que, si el pozo es lo suficientemente profundo, se puede alcanzar estos valores y al excederlos el cambio radica en el liner; de lo contrario, se debe distribuir la profundidad de manera proporcional, para ello también se ha calculado el mínimo total:

Ecuación 39: mínimo total en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas

$$\text{minimoTotal} = T = 5 \times 50 = 250 m \quad (39)$$

Esto significa que, para que el pozo tenga sentido,  $P \geq 250$ .

Donde  $P$  es la profundidad del pozo, siendo esta equivalente a la profundidad seleccionada por el usuario.

Lo siguiente es el cálculo de los “excesos ideales”, El “exceso ideal” de cada etapa es la cantidad de metros que se deben agregar al mínimo para alcanzar el valor objetivo. Es decir, para cada etapa  $i$  debe seguir la formula:

Ecuación 40: exceso ideal en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas

$$\text{Exceso Ideal}_i = T_i - 50 \quad (40)$$

Donde:

$\text{Exceso Ideal}_i$ : Es el exceso en la etapa  $i$

$T_i$ : Se refiere al target de la etapa  $i$

Es así como para cada una de las etapas queda de la siguiente manera:

- Etapa 1:  $150 - 50 = 100$
- Etapa 2:  $600 - 50 = 550$
- Etapa 3:  $1000 - 50 = 950$
- Etapa 4:  $900 - 50 = 850$
- Etapa 5:  $800 - 50 = 750$

Con ello obtenemos la suma de los excesos ideales:

$$\text{sumaExcesosIdeales} = 100 + 550 + 950 + 850 + 750 = 3200$$

Esta suma es importante ya que se utiliza para el cálculo de excesos por etapa, pero también se debe calcular antes el exceso disponible, el cual viene a partir de los valores obtenidos por el usuario:

Ecuación 41: cálculo de rango adicional disponible en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas

$$R = P - \text{minimoTotal} \quad (41)$$

Donde:

$R$ : metros adicionales disponibles para alcanzar los valores ideales.

$P$ : longitud de profundidad del pozo introducida al programa por el usuario

En el rango en que se aplica la distribución proporcional (cuando  $P$  es menor que el valor ideal máximo para distribuir proporcionalmente),  $R$  representa los metros adicionales disponibles para alcanzar los valores ideales, entonces con estos datos ya se puede calcular la distribución proporcional de cada etapa, para ello se ha deducido la ecuación siguiente:

Ecuación 42: cálculo de exceso por cada una de las etapas del pozo para algoritmo de decisión en caso de 5 etapas

$$\text{exceso}_i = \left( \frac{\text{ExcesoIdeal}_i}{\text{sumaExcesosIdeales}} \times R / 10 \right) \times 10 \quad (42)$$

La división entre 10 y posterior multiplicación por 10 se hace para asegurar que el resultado sea un múltiplo de 10, sin embargo, debido a errores de redondeo, para la última etapa se calcula el exceso como el residuo:

Ecuación 43: cálculo de exceso disponible para la etapa del liner en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas.

$$\text{exceso}_5 = R - \sum_{i=1}^4 \text{exceso}_i \quad (43)$$

Donde:

$\sum_{i=1}^4 \text{exceso}_i$  : se refiere a la suma de los excesos desde  $i$  hasta  $n$  etapas, siendo  $n = 4$

$R$ : metros adicionales disponibles para alcanzar los valores ideales.

Y finalmente para cada longitud asignada se le suma "50" que se había quitado al principio para completar la longitud de cada etapa:

Ecuación 44: cálculo de rango para cada una de las etapas en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas.

$$E_i = 50 + \text{exceso}_i \quad (44)$$

Donde:

$E_i$ : longitud calculada por cada etapa  $i$

Cumpliendo que de esta manera la sumatoria de las 5 etapas sea igual al valor que el usuario ha seleccionado para el pozo.

Todo este proceso es para el caso de que "P" se encuentre en el rango de 250 a 1 500 metros, sin embargo, en el caso que "P" se encuentre en el rango de 1 500 a 3 450 se tomara un criterio un poco diferente, el cual es definiendo el liner como constante a 800 metros, para ello se fija  $E_5 = 800$  y se distribuye el exceso restante en  $R'$ , ósea entre las otras 4 etapas restantes, para ello también se calcula su propia suma de excesos ideales:

Ecuación 45: cálculo de rango adicional entre las 4 etapas superiores al liner en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas para un valor de "P" en el rango de 1 500 a 3 450.

$$R' = P - (800 + 4x50) = P - 1000 \quad (45)$$

Donde:

$R'$ : metros adicionales disponibles para alcanzar los valores ideales.

$P$ : longitud de profundidad del pozo introducida al programa por el usuario

Luego de la etapa 1 a la 4 se aplica la formula:

Ecuación 46: cálculo de exceso por cada una de las etapas del pozo para algoritmo de decisión en caso de 5 etapas para un valor de “ $P$ ” dentro del rango de 1 500 a 3 450.

$$exceso_i = \left( \frac{ExcesoIdeal_i}{sumaExcesosIdeales} x R' / 10 \right) x 10 \quad (46)$$

Y para la quinta etapa siguiendo la misma lógica del anterior procedimiento queda como:

Ecuación 47: cálculo de exceso disponible para la etapa del liner en el algoritmo de decisión en caso de 5 etapas para un valor de “ $P$ ” dentro del rango de 1 500 a 3 450.

$$exceso_5 = R - \sum_{i=1}^4 exceso_i \quad (47)$$

Donde,  $R$  son los metros adicionales disponibles para alcanzar los valores ideales.

$\sum_{i=1}^4 exceso_i$  : se refiere a la suma de los excesos desde  $i$  hasta  $n$  etapas, siendo  $n = 4$

Asignando los resultados a cada etapa con la ecuación (44) se tiene:

$$E_i = 50 + exceso_i$$

Y finalmente cuando  $P > 3450$  se usará el proceso almacenado para cumplir con la longitud que el usuario necesita.

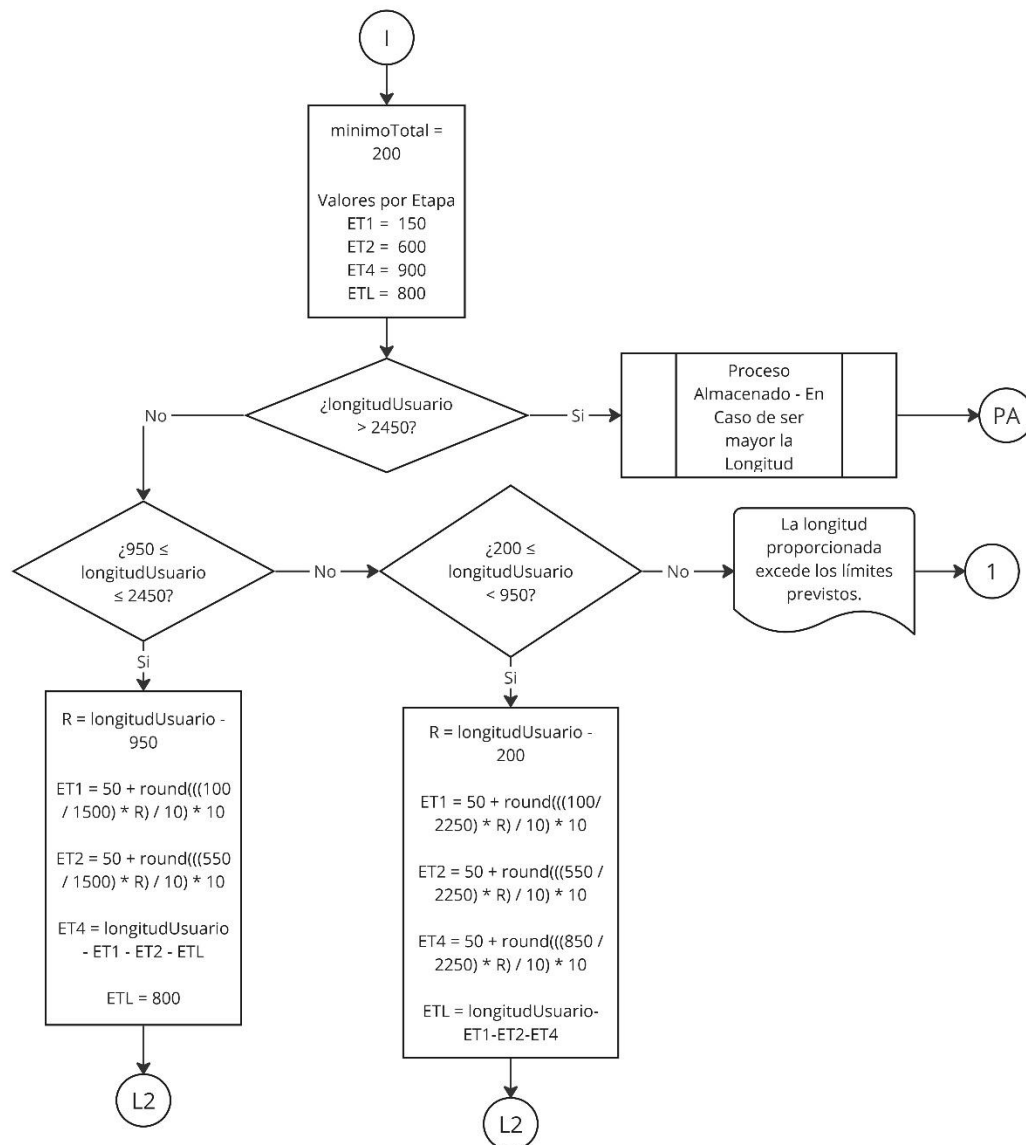


Figura 32. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

En el caso de un pozo convencional de 4 etapas (Figura 32), el proceso de distribución sigue el mismo razonamiento, pero con algunas modificaciones en los valores objetivo y los cálculos de los excesos, la eliminación de una etapa significa que se deben redistribuir los valores de manera equitativa entre las cuatro etapas restantes, asegurando que cada una mantenga un mínimo de 50 unidades y que los incrementos sean múltiplos de 10.

Se mantiene la estructura básica del modelo anterior, asegurando que cada etapa tenga un mínimo de 50 unidades, los valores objetivo de cada etapa se ajustan, eliminando la etapa intermedia, obteniendo ahora un mínimo total de 200 y siendo la suma de los excesos:

$$\text{sumaExcesosIdeales} = 100 + 550 + 850 + 750 = 2250$$

Y posteriormente se asignan los valores a cada etapa por medio de la formula:

Ecuación 48: distribución ideal para el exceso por cada una de las etapas del pozo para algoritmo de decisión en caso de 4 etapas.

$$E_i = 50 + \left( \frac{T_i - 50}{\text{sumaExcesoIdeal}} * (P - 200) \right) \quad (48)$$

Donde:

$E_i$ : longitud calculada por cada etapa  $i$

$T_i$ : Se refiere al target de la etapa  $i$

$P$ : longitud de profundidad del pozo introducida al programa por el usuario

Todo esto solo cuando el valor de  $P$  se encuentra por debajo del umbral de 950 metros, en el dado caso sea mayor que eso la suma de los excesos ideales se convertirá en 1500 ya que el liner será independiente y la formula toma la nueva forma de:

Ecuación 49: distribución ideal para el exceso por cada una de las etapas del pozo para algoritmo de decisión en caso de 4 etapas en el caso de superar el umbral de 950 metros.

$$E_i = 50 + \left( \frac{T_i - 50}{\text{sumaExcesoIdeal}} * (P - 950) \right) \quad (49)$$

Siempre tomando en cuenta que la etapa final a calcular se hará con respecto a los excesos ya obtenidos:

Ecuación 50: ecuación general para el cálculo de exceso disponible para la etapa del liner para los algoritmos del programa en cualquier rango de "P".

$$exceso_x = R - \sum_{i=1}^{x-1} exceso_i \quad (50)$$

Donde:

$\sum_{i=1}^{x-1} exceso_i$  : se refiere a la suma de los excesos desde  $i$  hasta  $n$  etapas, siendo  $n = x - 1$

Y en dado caso el valor del usuario este por encima de la suma de los máximos de cada etapa, entonces recurrirá al proceso almacenado.

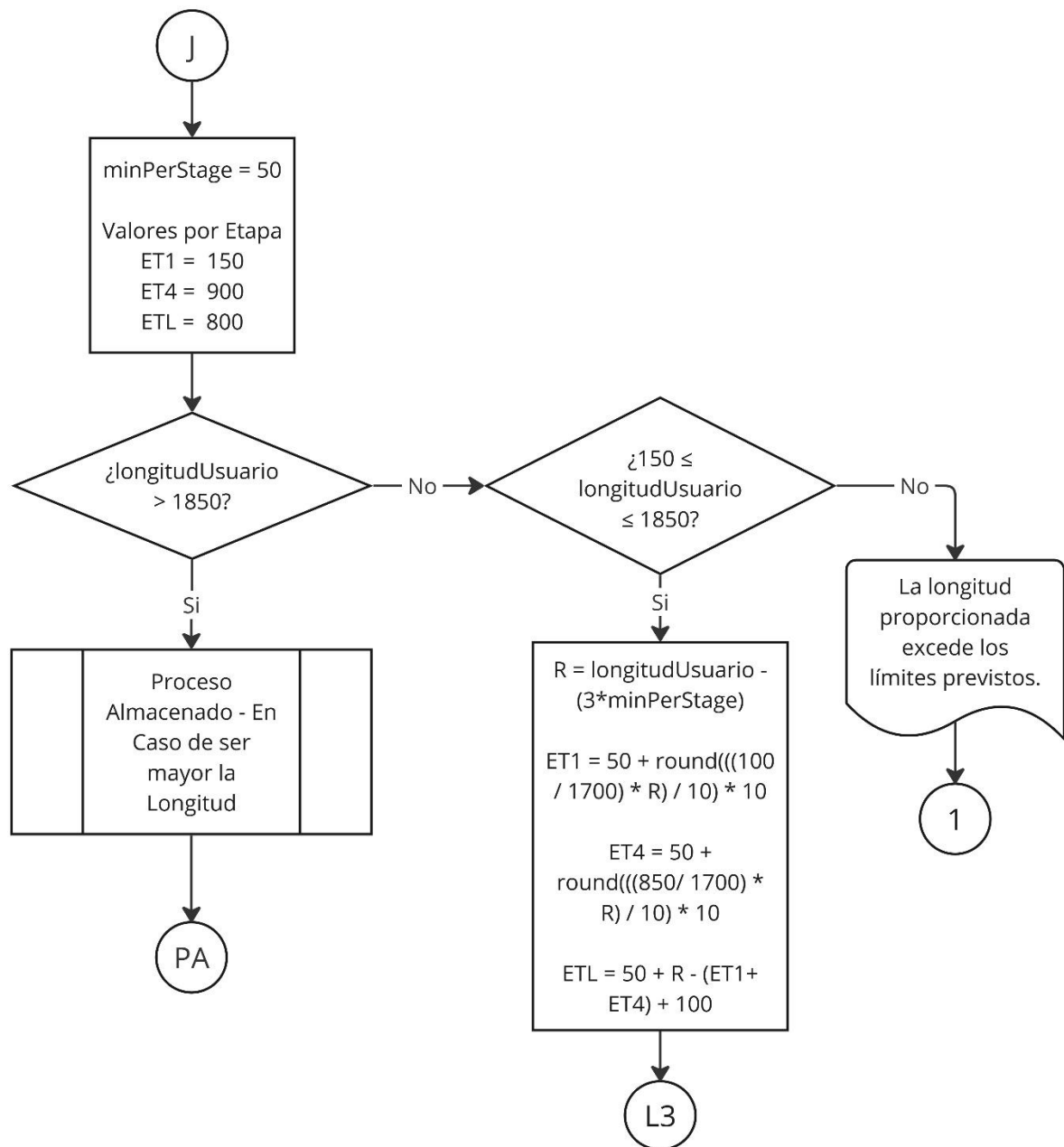


Figura 33. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

En el caso de ser un pozo exploratorio de 3 etapas (Figura 33), pasa por una secuencia similar, pero en este caso no hay un umbral establecido a partir del cual se conservan 800 metros en la etapa del liner, por el contrario aquí va a ir variando desde el principio con lo cual si el usuario desea que el pozo sea más profundo que la suma de los máximos, entonces el exceso se va a agregar en el

liner, mientras que si esta más debajo de dicho valor, se van a calcular los exceso sobre 150 y se van a distribuir de forma uniforme, teniendo como resultado la siguiente ecuación:

Ecuación 51: cálculo de los valores de profundidad de cada una de las etapas por debajo del máximo ideal en el algoritmo del programa para pozos de 3 etapas.

$$E_i = 50 + \left( \frac{T_i - 50}{1700} * (P - 150) \right) \quad (51)$$

Donde:

$E_i$ : longitud calculada por cada etapa  $i$

$T_i$ : Se refiere al target de la etapa  $i$

$P$ : longitud de profundidad del pozo introducida al programa por el usuario

En el caso de que el valor proporcionado por el usuario este por encima de los máximos, entonces el programa decidirá seguir con el proceso almacenado (Figura 34).

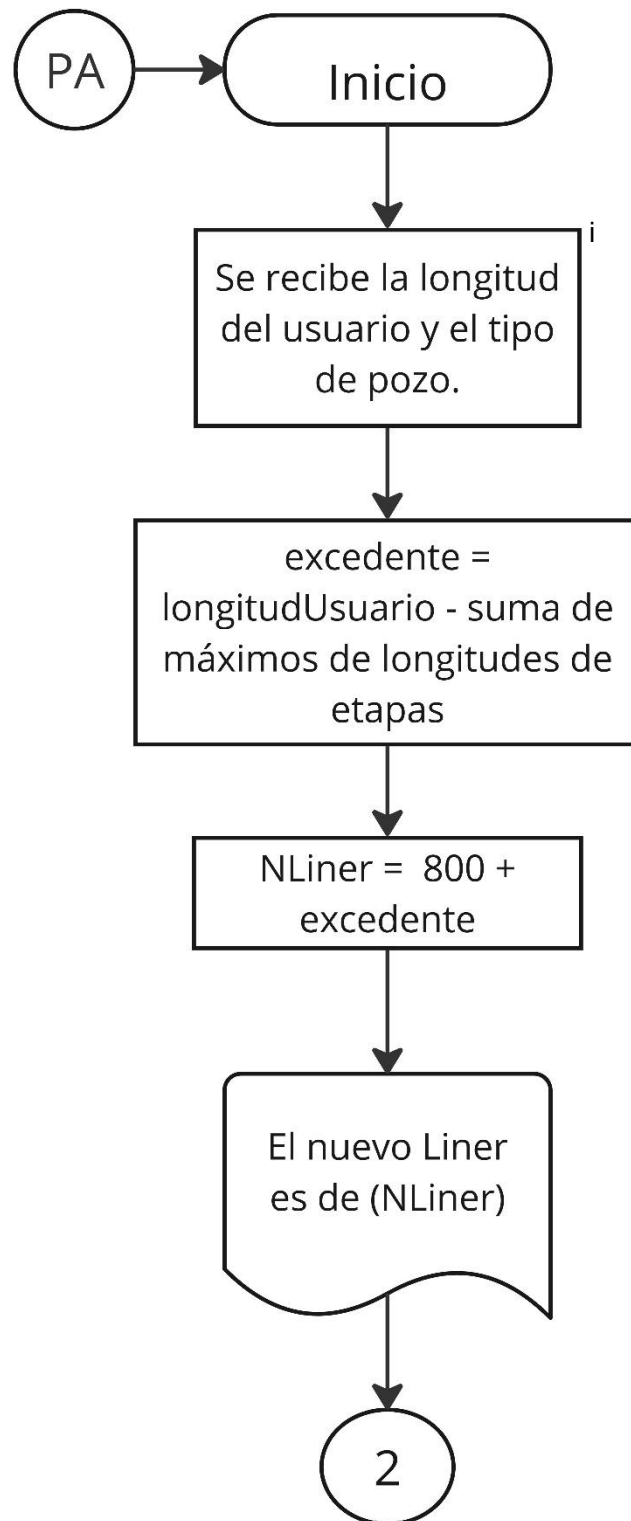


Figura 34. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

<sup>i</sup> La longitud del usuario se refiere a la profundidad del pozo que se ha seleccionado, la cual se desea para los cálculos de diseño en particular.

El proceso almacenado sirve cuando las longitudes de los pozos proporcionada por el usuario exceden a la sumatoria de los límites mayores de un pozo, ya sea exploratorio o convencional.

Para solventar los excesos de longitudes más allá de la suma de los máximos independientemente de la cantidad de etapas, obtiene el valor de la suma de los máximos que se están evaluando y la longitud del usuario, el proceso almacenado se encarga de extraer ese excedente o diferencia entre el valor proporcionado por el usuario y la suma de los máximos que se están evaluando en ese momento, para posteriormente ese valor extra sumarlo al liner, de esta forma se respetan los valores máximos de todas las otras etapas y se suma al liner el cual puede y tiene la capacidad de aumentar su longitud sobre el valor de sumas máximas.

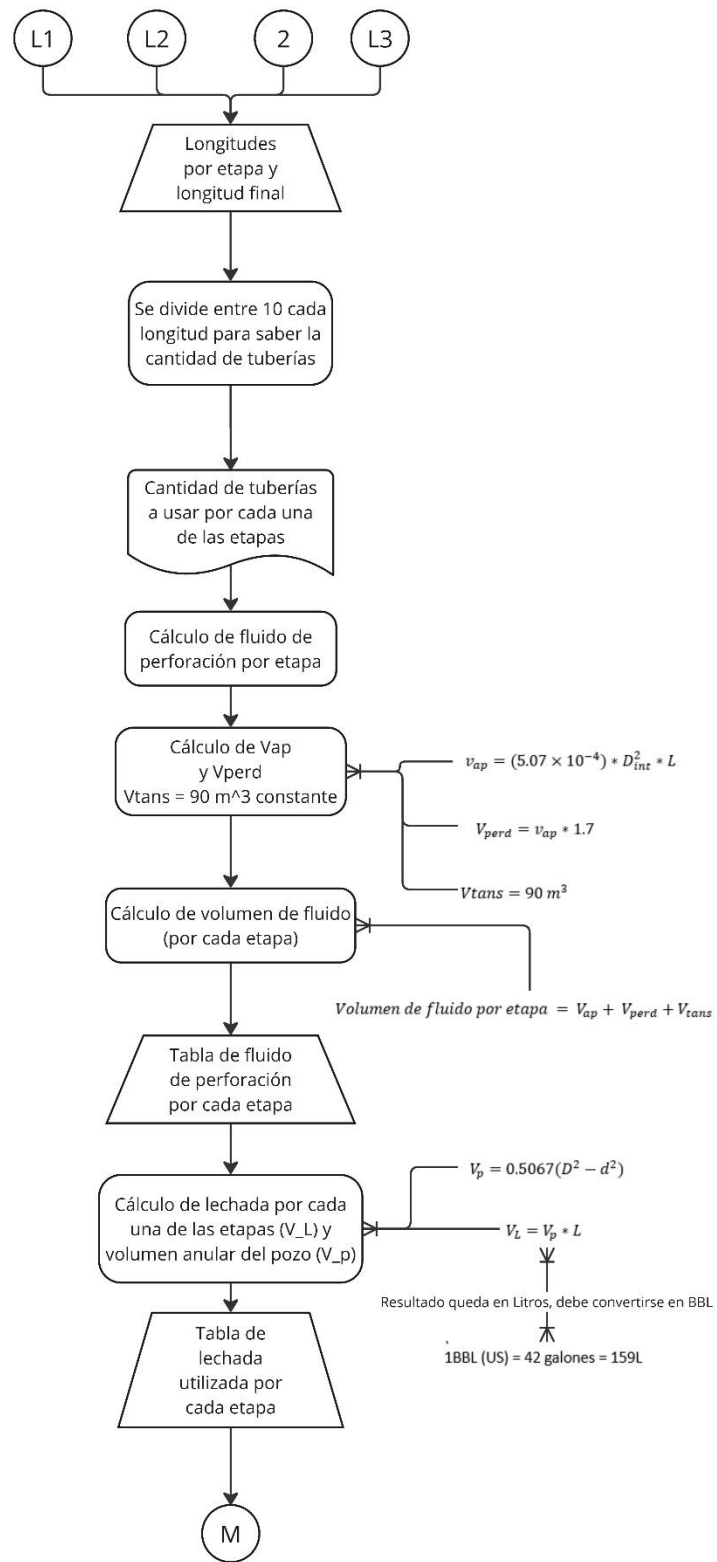


Figura 35. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

Una vez calculadas las longitudes de cada etapa y sus respectivos diámetros, sea de cualquier tipo de pozo, se imprimen los datos y procede a estimar el dato de cuántas tuberías hay por cada una de las etapas (Figura 35). Sabiendo que cada tubería mide una longitud de 10 metros y posterior al cálculo de la cantidad de tuberías, se le brinda ese dato al usuario, luego el programa calculará el fluido de perforación por cada una de las etapas para agregar este nuevo dato a las respectivas tablas donde se mostrarán los datos, para ello toma datos previamente calculados y constante, brindando los datos tanto en litros como en BBL.

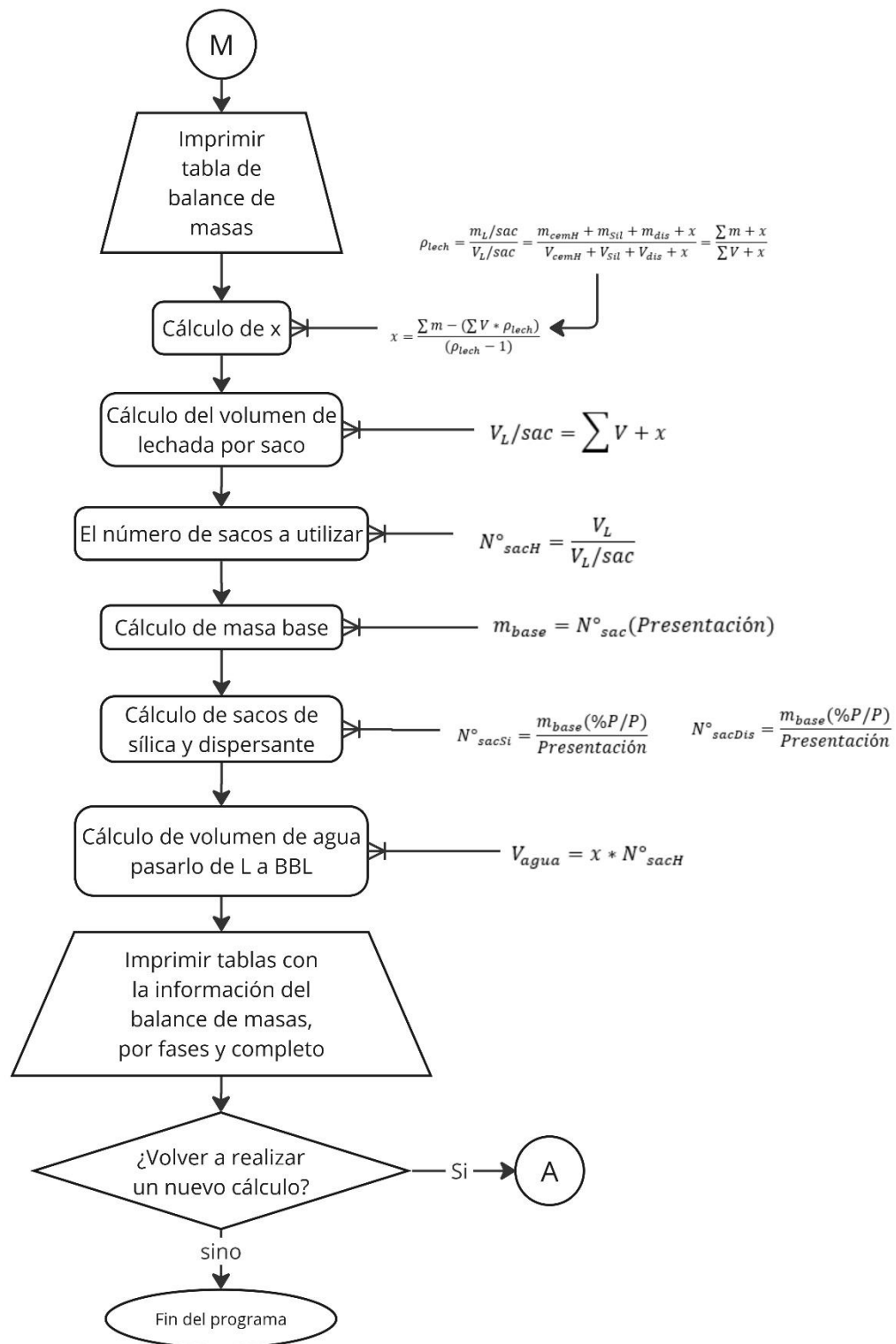


Figura 36. Diagrama de flujo de la solución a programar (continuación)

Para terminar de llenar los datos de tablas de información por etapa del pozo, el programa pasa a calcular la cantidad de lechada por cada una de las etapas y a calcular el balance de masas (Figura 36), con lo que brinda información del número de saco por cada uno de los solventes que se utilizarán en la lechada y la cantidad de agua en cada etapa para realizar la lechada.

Con esto se completan los resultados y datos que brindará la aplicación como información necesaria para el diseño del pozo seleccionado por el usuario, y a partir de aquí en la ventana de resultados, el usuario tendrá la opción de realizar otros cálculos (redirigiendo al flujograma de la figura 24), o directamente el usuario podrá finalizar el programa.

El diagrama de flujo completo se puede observar en la figura 37 a continuación. En esta se muestran los distintos caminos a elegir a través del código a programar, donde se ha decidido mencionar por letras los diferentes algoritmos para una visualización adecuada de justamente la ramificación de las decisiones y no necesariamente del contenido en sí dentro de ellas puesto que este ya ha sido descrito en las páginas previas. La totalidad del diagrama con algoritmos incluidos presenta una extensión tal que no es viable su presentación no puede hacerse sino es por secciones como anteriormente se han presentado.

La unificación de cada uno de estos fragmentos da forma a un diagrama de flujo mucho más grande, este diagrama de flujo deja ver las conexiones entre cada una de las partes.

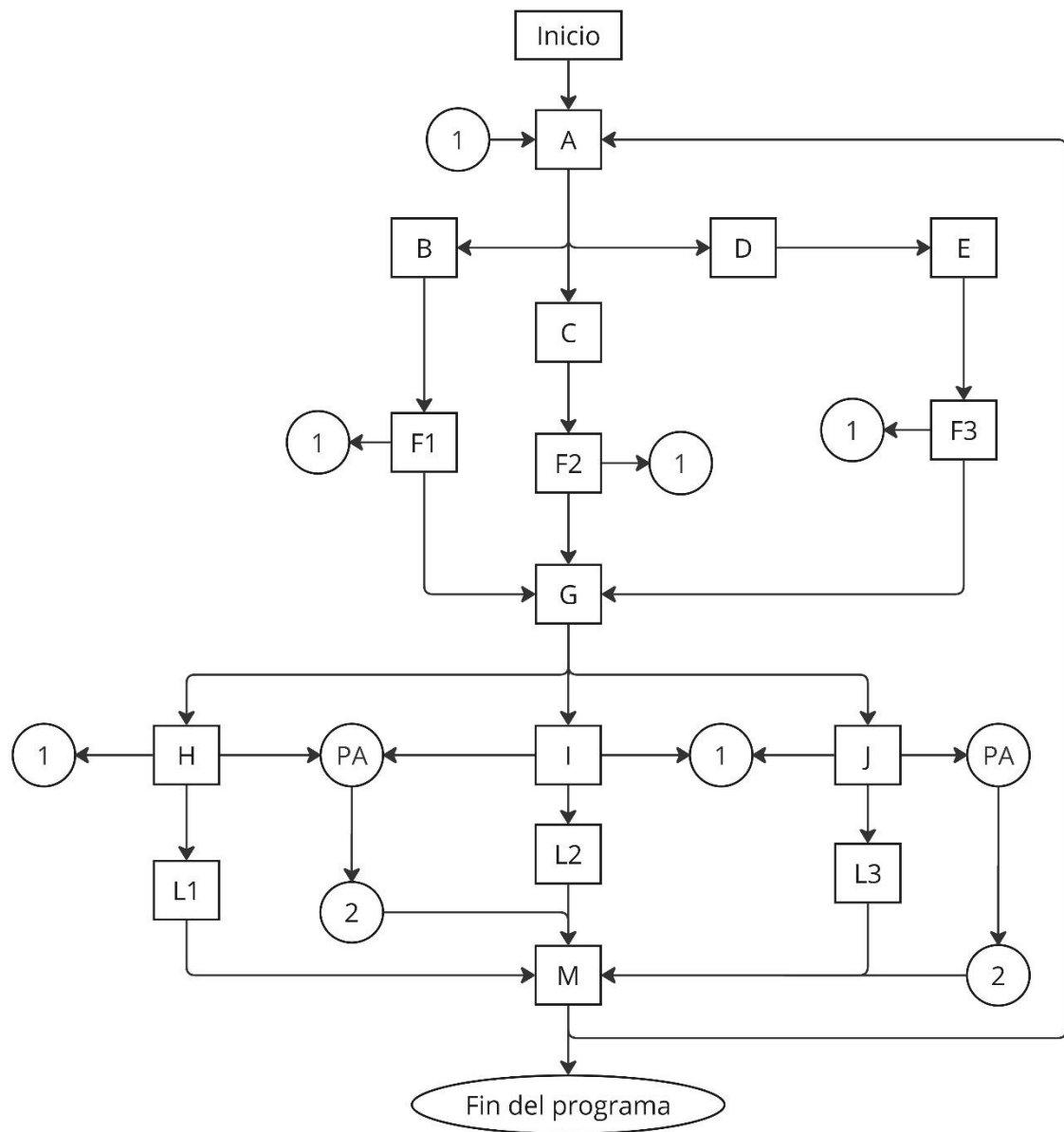


Figura 37. Diagrama de flujo completo representado con sus letras correspondientes

### 3.2.4 Creación de simulaciones necesarias (Gráficos e interfaz)

Para la realización del software y brindar un entorno amigable se han desarrollado primeramente diferentes diseños entre los cuales ha destacado el seleccionado, donde se define más orden y se optimiza el espacio, sin recurrir a elementos demasiado complejos que puedan complicar la programación, quedando como resultado el siguiente para el formulario de datos que el usuario debe llenar. El mostrado en la figura 38 es solamente un boceto que se ha tomado como referencia para el diseño final de los elementos visuales dentro de la aplicación, y cada elemento se ha adaptado a las capacidades de las librerías y lenguaje de programación seleccionados.

**Datos del Pozo**

Tipo de Pozo:

Etapas del Pozo  
 3 Etapas  4 Etapas  5 Etapas

**Datos Constantes**

$g = 9.81$  (Gravedad de la tierra)

Presión del reservorio [Pr]

Unidad:  
 Pascales  Kilopascal  Megapascal

Densidad del vapor en el reservorio [pr]

**Datos para el Procedimiento**

Nivel de Azufre:

Profundidad

Masa de valor seco (kg/s) [m]

Presión de la superficie [Ps]

Unidad:  
 Pascales  Kilopascal  Megapascal

Densidad del vapor en la superficie [ps]

Aceptar Reiniciar

Figura 38. Boceto inicial hecho en excalidraw, como frontend prototipo de la aplicación.

Por otro lado, también fue necesario el diseño de la página de resultados, que este programa para evitar problemas de refresco de la página, se utilizó un proceso por partes, siendo el llenado del formulario por parte del usuario y luego de enviar los datos, esta ventana del formulario desaparece y aparecerá la ventana de resultados. El diseño de la ventana de resultados presentó diferentes versiones, sin embargo, su versión final es la mostrada en las imágenes 39 y 40, donde se plasma de forma ordenada los datos finales de los resultados.

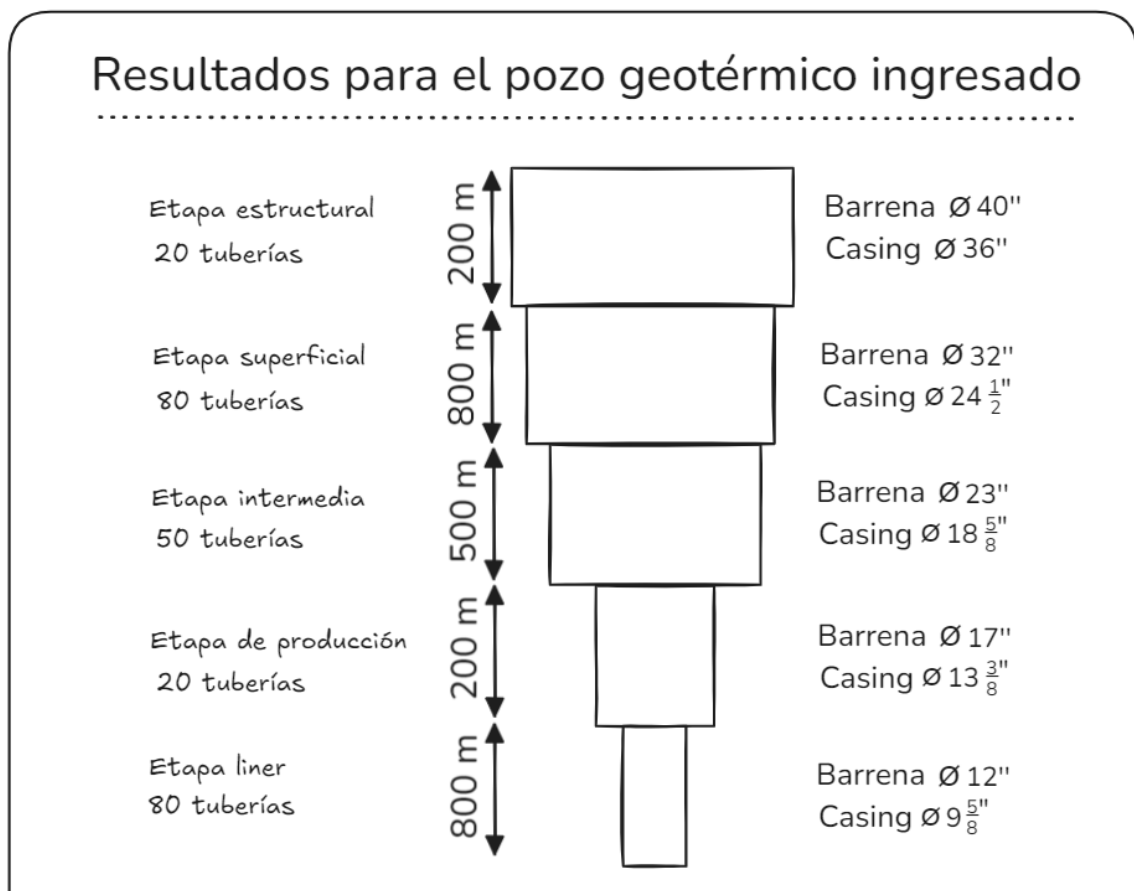


Figura 39. Boceto de ventana de resultados (parte 1) realizada en excalidraw, para mostrar los datos principales y figura del pozo seleccionado por el usuario

En la figura 39, podemos notar la primera parte del boceto de que se ha realizado para el diseño de la página de resultados, siendo esta posterior sujeta a leves cambios, este boceto es solo un ejemplo, ya que para el programa se realizó un proceso de selección para que determine la cantidad de etapas y la imagen será interactiva por lo que se adapta a los datos del usuario.

| Etapa                        | Ø barrena (pulg) | Ø casing (pulg) | WOB (lb-pulg) | Cantidad de Tuberías | Longitud (m) | Fluido de perforación (m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|------------------|-----------------|---------------|----------------------|--------------|---|
| Estructural                  | 40               | 36              | 176000        | 7                    | 70           | 243.31                                  |
| Superficial                  | 26               | 24              | 114400        | 23                   | 230          | 302.83                                  |
| Intermedia                   | 22               | 20              | 96200         | 20                   | 200          | 336.46                                  |
| Producción                   | 17 ½             | 15 ½            | 77000         | 40                   | 400          | 257.69                                  |
| Liner                        | 12 ½             | 8 ½             | 53900         | 80                   | 800          | 254.33                                  |
| Valores totales para el pozo |                  |                 |               |                      | 1700         | 1058.18                                 |

| Etapa       | Cementación |     |
|-------------|-------------|-----|
|             | Litros      | BBL |
| Estructural |             |     |
| Superficial |             |     |
| Intermedia  |             |     |
| Producción  |             |     |
| Liner       |             |     |
| Total       |             |     |

Nivel de propiedades fisicoquímicas dañinas a las que el pozo estará sometido:

Figura 40. Boceto de ventana de resultados (parte 2) realizada en excalidraw, para mostrar los datos de cada etapa del pozo por medio de tablas de forma ordenada

En la figura 40 podemos ver la segunda parte del boceto para la página de resultados, siendo esta parte la que detalla las respuestas tras los cálculos de cada una de las etapas, y brindando datos no solo de dimensiones, sino también datos para el fluido de perforación y datos de la cementación, para complementar los diámetros de barrena sugeridos, y así facilitar el proceso de elección.

### **3.3 Desarrollo del Software.**

El desarrollo del software para el diseño de pozos geotérmicos requiere la implementación de modelos matemáticos y lógicos dentro del código de la aplicación que permitan de la forma más simple realizar procesos complejos dentro del software con el fin de evitar cualquier error inesperado a la hora de realizar los cálculos, así como un correcto nombramiento de carpetas y lógica de programación, por lo cual se describirán los puntos más relevantes de este proceso y los directamente relacionados con el diseño de los pozos.

#### **3.3.1 Nombre y Estructura del Proyecto**

El software desarrollado se denomina "Geo-Project", nombre elegido para representar su enfoque en la geotermia y su posibilidad de crecer en este rubro y la gestión estructurada de datos relacionados con el diseño de pozos geotérmicos.

La aplicación ha sido desarrollada de forma que garantice un alto rendimiento y eficiencia, por lo que la estructura del proyecto incluye diferentes carpetas y archivos clave que organizan los recursos y funcionalidades del software (Figura 41).

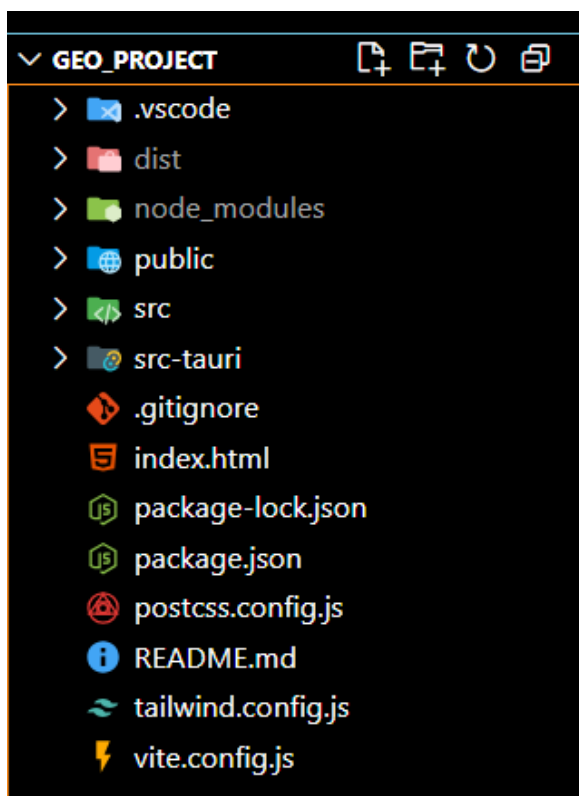


Figura 41. Carpetas dentro del código de la aplicación Geo-Project

Fuente: Visual Studio Code.

- src/: Contiene el código fuente principal del proyecto, incluyendo los módulos responsables del cálculo de parámetros geotérmicos.
- src-tauri/: Almacena los archivos relacionados con Tauri, el framework utilizado para empaquetar la aplicación como software de escritorio.
- dist/: Carpeta generada tras la compilación, donde se almacenan los archivos finales listos para la distribución.
- node\_modules/: Contiene las dependencias de la aplicación, administradas por Node.js.
- public/: Incluye archivos estáticos como imágenes, íconos y otros recursos utilizados en la interfaz.

- `index.html`: Archivo base que sirve como punto de entrada para la aplicación.
- `package.json` y `package-lock.json`: Gestionan las dependencias y scripts del proyecto.
- `tailwind.config.js` y `postcss.config.js`: Configuración de estilos y optimización de CSS mediante Tailwind CSS.

La correcta organización y nombramiento de estas carpetas y archivos facilitan el mantenimiento del código, optimización y facilidad de integrar las nuevas funcionalidades, es decir, actualizaciones que ha tenido el programa a lo largo de su desarrollo y su posible potencial para agregar más clases.

Con respecto a las carpetas (Figura 42), existen tres importantes que alojan los archivos principales del programa, estas carpetas son:

- `data`: Es la carpeta encargada del almacenamiento de archivos json a utilizar, y algunos procesos que pueden ser iterativos o reutilizables, como lo son las funciones de selección de diferentes parámetros del pozo o bien las mismas tablas que contienen todos los datos de diámetros, barrenas y casing.
- `FormMain`: Contiene el formulario principal donde el usuario tendrá interacción directa con el software, además de diferentes validaciones que permitirán al programa tomar decisiones lógicas acorde a los datos que el usuario introduzca.
- `Results`: Posee tanto la imagen de bienvenida y cargado de datos iniciales de arranque de la aplicación, como también la ventana de resultados finales, la cual mostrará al usuario el diagrama y las tablas planteada en los bocetos de frontend.

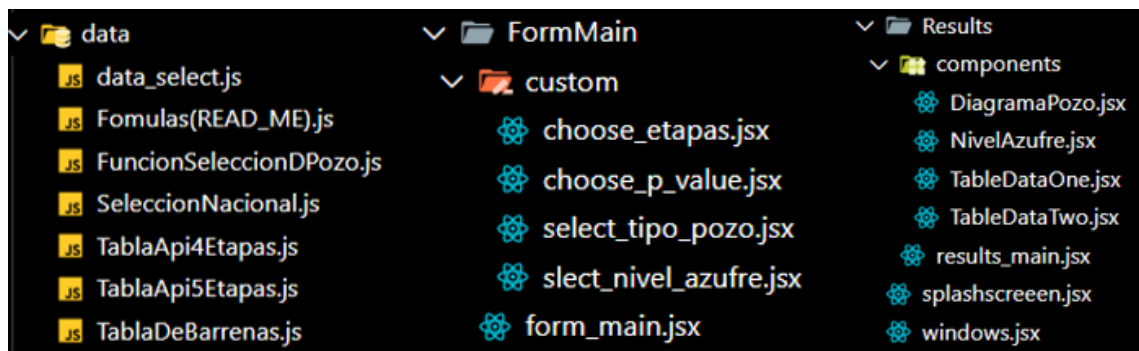


Figura 42. Carpetas fundamentales del desarrollo de la aplicación Geo-Project

Fuente: Visual Studio Code

### 3.3.2 Implementación de módulos para el cálculo

El programa posee una carpeta en especial que está encargada del proceso de procesamiento de los datos que haya brindado el usuario, este documento es “FuncionSeleccionDPozo.js”, dicha carpeta posee los cálculos principales y algunos criterios de selección, sin embargo, los puntos a destacar de dicho código son la declaración de variables de entrada, algunos procesos, la relación de algunas formulas con respecto al código y las variables de salida, entre estos procesos están primeramente la declaración de variables, recogiendo los datos que ha proporcionado el usuario para enviarla a la función que realiza los procesos de cálculos, tal como se ve en la figura 43.

```
// Functions
export const parametrosPozo = async (
  FlujomasicoUsuario,
  ProfundidadPozoUsuario,
  presionReservorioUsuario,
  densidadReservorioUsuario,
  EtapasDPozoUsuario,
  TipoDPozoUsuario,
  ContadorExploConve,
  presionSuperficieUsuario,
  densidadSuperficieioUsuario,
  CoeficienteAdiabatico
) => {
```

*Figura 43. Listado de variables de entrada brindadas por el usuario para el proceso interno de cálculos dentro de la aplicación Geo-Project*

*Fuente: Visual Studio Code*

Más adelante en el código tenemos una validación importante, la cual indica el tipo de pozo que haya seleccionado el usuario, esto determinará las etapas que se van a imprimir en la tabla visual de resultados, además de que este parámetro indicará al código que decisiones debe tomar más adelante (Figura 44).

```
if (EtapasDPozoUsuario === 3) {  
    EtapasSalida[0] = "Estructural";  
    EtapasSalida[1] = "Produccion";  
    EtapasSalida[2] = "Liner";  
} else if (EtapasDPozoUsuario === 4) {  
    EtapasSalida[0] = "Estructural";  
    EtapasSalida[1] = "Superficial";  
    EtapasSalida[2] = "Produccion";  
    EtapasSalida[3] = "Liner";  
} else if (EtapasDPozoUsuario === 5) {  
    EtapasSalida[0] = "Estructural";  
    EtapasSalida[1] = "Superficial";  
    EtapasSalida[2] = "Intermedio";  
    EtapasSalida[3] = "Produccion";  
    EtapasSalida[4] = "Liner";  
}
```

*Figura 44. Sistema de decisión de las etapas a tomar en cuenta para los cálculos dentro del programa Geo-Project*

*Fuente: Visual Studio Code*

También se observa en la figura 45, la declaración de las variables, estas variables son las que se utilizarán para los cálculos principales, entre los cuales se encuentra el cálculo del volumen superficial y posterior el diámetro de producción mínimo necesario para el pozo.

```

let Dproduction = 0;
let masic = FlujomasicoUsuario;
let pi4 = Math.PI;
let gravedad = 9.81;
let Zs = ProfundidadPozoUsuario;
let CoefAdiabat = CoeficienteAdiabatico;
let prenS = presionSuperficieUsuario;
let denS = densidadSuperficieUsuario;
let prenR = presionReservorioUsuario;
let denR = densidadReservorioUsuario;

```

Figura 45. Declaración de variables iniciales para el cálculo de diámetro de producción dentro del programa Geo-Project

Fuente: Visual Studio Code

Mientras para el cálculo del volumen superficial, aunque ya se tienen los datos de entrada del usuario se ha realizado el siguiente arreglo que se muestra en la figura 46.

```

let a = prenS / denS;
let b = prenR / denR;
let c = a - b;
let d = CoefAdiabat - 1;
let e = CoefAdiabat / d;
let f = e * c;
let g = gravedad * Zs;
let h = g + f;
let i = 2 * h;
let j = Math.pow(denS, 2);
let k = Math.pow(denR, 2);
let l = j / k;
let m = l - 1;
let n = i / m;
let v_s = Math.sqrt(n);
console.log("v_s:", v_s);

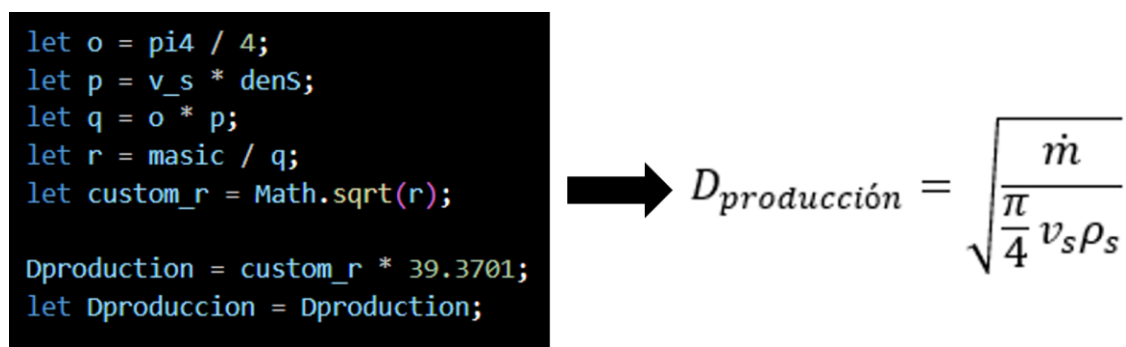
```

$$v_s = \sqrt{\frac{2 \left( gZ_s + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left( \frac{P_s}{\rho_s} - \frac{P_r}{\rho_r} \right) \right)}{\frac{\rho_s^2}{\rho_r^2} - 1}}$$

Figura 46. Comparación del código de la ecuación para el cálculo de volumen superficial dentro del software Geo-Project

Donde podemos notar como la ecuación original se ha seccionado por partes, esto para evitar errores o malos cálculos, entonces se ha manejado una secuencia de pasos para llegar a la respuesta, tomando en cuenta el orden de resolución de la ecuación original.

Este proceso de seccionamiento de la ecuación pasa también con el diámetro de producción, la cual queda de la siguiente manera (Figura 47).



```

let o = pi4 / 4;
let p = v_s * dens;
let q = o * p;
let r = masic / q;
let custom_r = Math.sqrt(r);

Dproduction = custom_r * 39.3701;
let Dproduccion = Dproduction;

```

$$D_{\text{producción}} = \sqrt{\frac{\dot{m}}{\frac{\pi}{4} v_s \rho_s}}$$

Figura 47. Código de los pasos para obtener el diámetro de producción, simulando la forma equivalente, dentro del software Geo-Project

Fuente: Visual Studio Code

Aquí se han tomado datos ya introducidos por el usuario y además del valor ya calculado por el mismo software, realizando de nuevo los cálculos por pasos para obtener un resultado acertado y seguir con los demás procesos de selección, donde nuevamente cuando se trata de ecuaciones complejas se realiza este desglose de pasos para evitar problemas, además de que facilita el rastreo de posibles peculiaridades o problemas inusuales.

Posterior a este proceso de cálculo se toma criterio dentro del código, y el siguiente paso es la elección de un diámetro de producción dentro del rango definido, en especial para el caso de la selección nacional, donde se tienen ya normalizados dos diámetros, tanto para pozos exploratorios como para los convencionales (reinyección y producción), es aquí donde se ha programado al

código (Figura 48) para que compare la respuesta obtenida de diámetro de producción acorde a si se trata de un pozo convencional o exploratorio para reasignar un valor con el cual se trabajarán los procesos que estén dentro de la selección nacional con ese diámetro, de lo contrario, si se trata del método normado API, el diámetro obtenido anteriormente se mantendrá intacto para futuras selecciones dentro del código.

```
let DiamBusqueda = 0;

if (pozo === "Exploratorio") {
  if (Dproduction < 5.6876) {
    DiamBusqueda = 5.6875;
  } else {
    DiamBusqueda = 12.9375;
  }
} else {
  if (Dproduction < 9.626) {
    DiamBusqueda = 9.625;
  } else {
    DiamBusqueda = 13.375;
  }
}
```

*Figura 48. Selección de diámetro por medio del método nacional dentro del software Geo-Project*

*Fuente: Visual Studio Code*

A partir de este cálculo de criticidad donde se elige el diámetro más adecuado para cálculos con el método nacional, se empiezan a dividir los procesos que el código puede realizar, siendo uno el método nacional y el otro el método de normas API, para ello se tienen diferentes bases de datos, y para cargarlas, dependiendo del tipo de pozo y las etapas seleccionadas se ha programado esta decisión dentro del código, resultando como se muestra en la imagen 49, siendo

un proceso similar para el método nacional. Sin embargo, en las normas API se tienen dos archivos json para almacenar de forma diferente los datos, mientras que el json del método nacional posee las tablas necesarias para los cálculos realizados por este método, por lo que solo se recurre a una base de datos.

```

async function cargarSeleccionAPI(Etapas, Dproduccion) {
  try {
    let archivoJson = "";
    console.log("DProduccion");
    console.log(Dproduccion);
    if (Etapas === 5) {
      archivoJson = tabla_api_five_etapas_api;
    } else if (Etapas === 4) {
      archivoJson = tabla_api_four_etapas_api;
    } else {
      console.error("Solo se admiten 4 o 5 etapas.");
      return null;
    }
  }
}

```

Figura 49. Proceso de adquisición de datos por medio de bases de datos json dentro del programa Geo-Project

Fuente: Visual Studio Code

Tras cargar las bases de datos correspondientes se realizan las búsquedas correspondientes (Figura 50), en el caso del método nacional se busca entre los parámetros pre definidos dentro del software, en el caso de ser por el método de selección normado por la API se buscará el valor del diámetro de producción que coincida dentro de los rangos de las tablas de diámetros que posee la norma, una vez encontrado el rango se procede a tanto asignar los diámetros de casing como los diámetros de las barrenas correspondientes a cada una de las etapas, para posteriormente calcular el peso sobre la barrena, y posteriormente el fluido de perforación.

```

pozo;
Etapas;
let DiamBarrena;
let totalWOB = 0;
for (let i = 0; i < Etapas; i++) {
  DiamBarrena = diametrosBarrena[i];
  let WOB = 4400 * DiamBarrena;
  WOPSalida[i] = WOB;
  totalWOB += WOB;
  console.log(
    | `WOB para la etapa ${i + 1} (diámetro ${DiamBarrena}): ${WOB}`
  );
}
console.log(totalWOB);

let kons = Math.pow(10, -4);
let cosnt = 5.07 * kons;
let fluidoDPerforacion = 0;
let totalFluido = 0;

for (let i = 0; i < Etapas; i++) {
  let Dint = diametrosBarrena[i];
  let longEtapaValor = longitudEtapa[i];
  let diamcaudrado = Math.pow(Dint, 2);
  let Vap = cosnt * diamcaudrado * longEtapaValor;
  let Vperd = Vap * 1.7;
  let Vtans = 90;

  fluidoDPerforacion = Vap + Vperd + Vtans;
  totalFluido += fluidoDPerforacion;
  FluidPerforacionSalida[i] = fluidoDPerforacion;
}

```

Figura 50. Cálculo de WOB y de fluidos de perforación en el software Geo-Project

Fuente: Visual Studio Code

Posteriormente a esto se hacen los cálculos de cementación (Figura 51) tanto si es para el método nacional como si se trata de una selección por medio del método de normativas API, los valores de cementación se realizan por cada etapa, mientras que con el total de esta cementación se realiza un cálculo total del balance de masas para obtener los sacos de cemento a utilizarse en el proceso de cementación, como también sacos de aditivos, siendo estos sílica y dispersantes, además de calcular el volumen de agua en litros a utilizar para la mezcla y ese mismo valor convertido en BBL, estos datos (a excepción de los litros de agua) están redondeados a un valor próximo mayor en el caso de tener fracciones, para evitar confusiones de adquirir material inexacto.

```

let VolTotalLechadaLitros = 0;
let VolTotalLechadaBBL = 0;

for (let i = 0; i < Etapas; i++) {
  let DmayorAnul = diametrosBarrena[i];
  let DmenorAnul = diametros[i];
  let longEtapaValor = longitudEtapa[i];

  let CuadDiamMay = Math.pow(DmayorAnul, 2);
  let CuadDiamMen = Math.pow(DmenorAnul, 2);
  let DifeDiam = CuadDiamMay - CuadDiamMen;
  let VolParcial = 0.5067 * DifeDiam;
  let VolLechada = VolParcial * longEtapaValor;
  let VolLechadaDef = 2 * VolLechada;
  let VolLechadaBBL = VolLechadaDef / 159;

  VolTotalLechadaLitros += VolLechadaDef;
  VolTotalLechadaBBL += VolLechadaBBL;
  CementacionLitrosSalida[i] = VolLechadaDef;
  CementacionBBLSalida[i] = VolLechadaBBL;

  let xa1 = DenLech - 1;
  let xa2 = SumVol * DenLech;
  let xa3 = SumMas - xa2;
  let volymasAgua = xa3 / xa1;

  let volSac = SumVol + volymasAgua;

  let NsachH = VolTotalLechadaLitros / volSac;
  NsachH = Math.ceil(NsachH);
  SacosCementoHSalida = NsachH;

  let mbase = NsachH * PresetSacoH;

  let CalSilic = mbase * PorcePPSilic;
  let NSacSilic = CalSilic / PresetSacoAdit;
  NSacSilic = Math.ceil(NSacSilic);
  SacosSilicaSalida = NSacSilic;
  let CalDisp = mbase * PorcePPDisper;
  let NSacDisp = CalDisp / PresetSacoAdit;
  NSacDisp = Math.ceil(NSacDisp);
  SacosAditivosSalida = NSacDisp;

  let VolAgua = volymasAgua * NsachH;
  let VolAguaBBL = VolAgua / 159;
  VolAguaLitrosSalida = VolAgua;
  VolAguaBBLSalida = Math.ceil(VolAguaBBL);
}

```

Figura 51. Cálculo de cementación y balance de masas dentro del software Geo-Project

Fuente: Visual Studio Code

Tras este proceso los datos de los resultados obtenidos en cada una de las partes de este proceso se mandan a la clase results\_main para ser procesados de forma gráfica e imprimiendo de forma visual en tablas y gráficamente las respuestas para que el usuario pueda crear sus conclusiones respecto a su selección de datos de entrada.

## **Capítulo 4. Manual de usuario para el software**

### **4.1. Requisitos mínimos del sistema recomendados**

Sistema Operativo: Windows 10 (versión 1809 o superior) / Windows 11

Arquitectura: 64 bits (x86\_64)

CPU: Procesador de 64 bits (Intel/AMD)

RAM: 2 GB (mínimo) / 4 GB (recomendado)

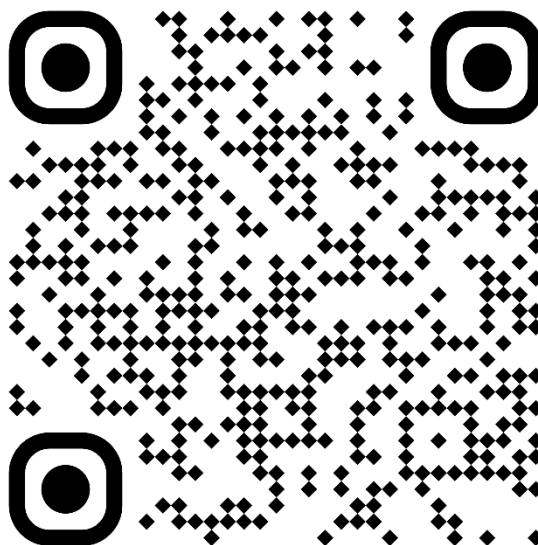
Espacio en Disco: Recomendado al menos 100 MB disponibles

Microsoft Edge WebView2 Runtime (ya viene en Windows 11, pero en Windows 10 puede ser necesario instalarlo)

Permisos de Ejecución: Puede ser necesario dar permisos en Windows Defender al instalar.

### **4.2. Instalación del programa**

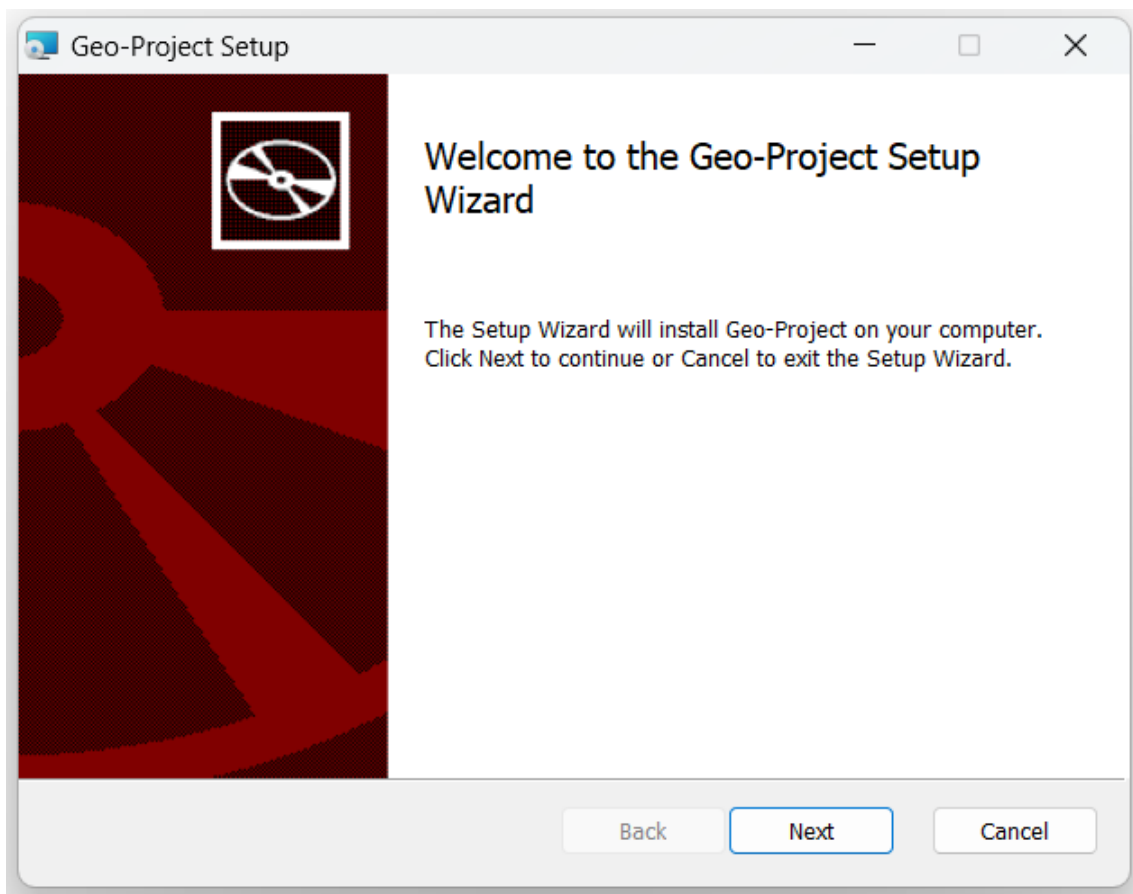
El link de descarga se puede encontrar al ingresar en el QR mostrado en la figura 52.



*Figura 52. QR de descarga del software Geo-Project*

El archivo descargable posee la extensión “.msi”, lo cual puede arrojar alertas de parte del navegador usado para descargarlo, esto es debido a que los archivos de este tipo son instaladores que pueden modificar el sistema, lo que genera preocupaciones de seguridad. Además, dado que el software es nuevo y no ha sido distribuido ampliamente, su reputación es baja, lo que incrementa la probabilidad de que sea marcado como sospechoso. Los navegadores también consideran el origen del archivo; si proviene de una fuente como Google Drive, que no está asociada a una firma digital confiable, y advierte que el archivo puede ser identificado como potencialmente riesgoso, aunque no sea un virus, y se puede instalar sin sufrir problemas.

Una vez el archivo se haya descargado, se debe hacer clic para ejecutarlo, abriendo la ventana de la figura 53.



*Figura 53. Ventana inicial del asistente de instalación del programa Geo-Project.*

*Fuente: Asistente de instalación de Geo-Project.*

Este es el asistente de instalación. Para empezar con la instalación se debe dar clic en "Next", arrojando la ventana de la figura 54.

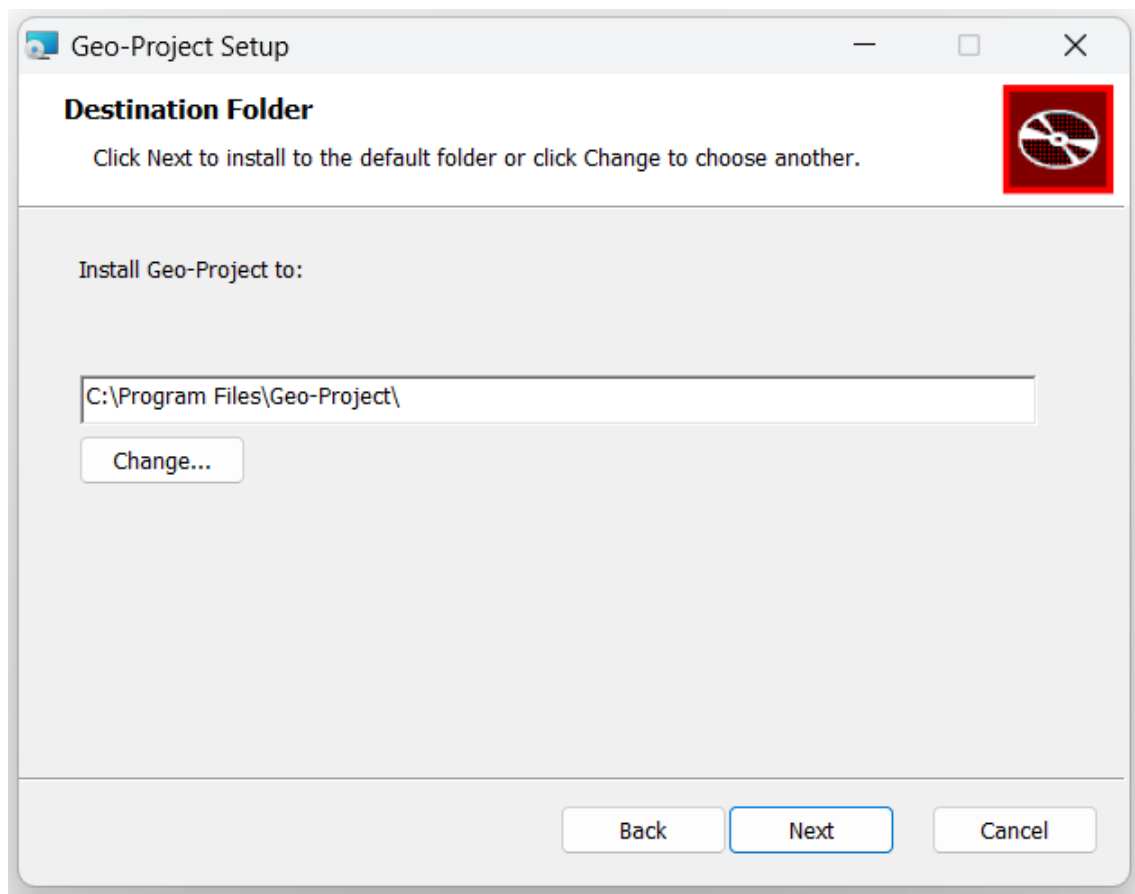
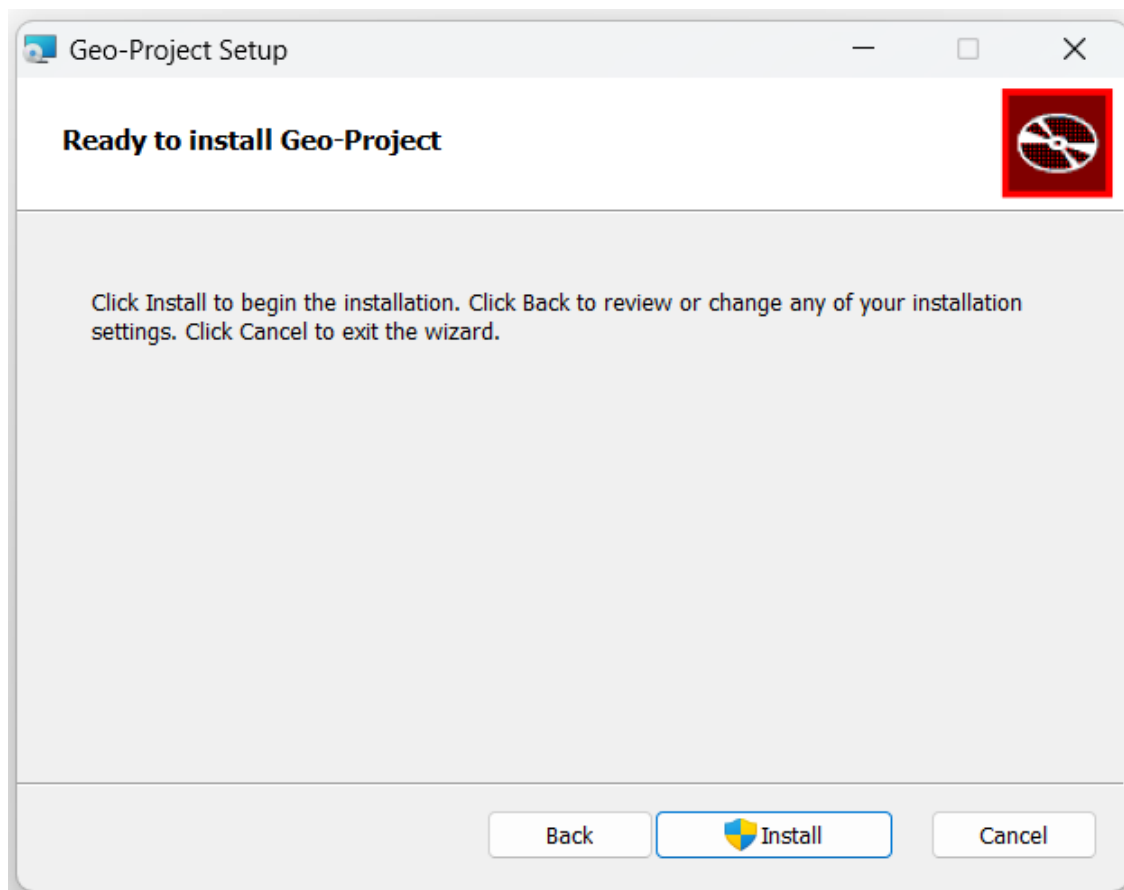


Figura 54. Ventana del destino de alojamiento del programa Geo-Project.

Fuente: Asistente de instalación de Geo-Project.

En esta se muestra el lugar donde quedará alojado el programa localmente, la dirección por defecto es en los archivos del programa del disco C, sin embargo, se puede cambiar en el botón “Change”. Una vez seleccionado, dar clic en “Next”. También abran dos botones disponibles en todo momento en este Asistente de Instalación, si se quiere volver a la ventana anterior se puede dar clic en “Back” o si se desea cancelar la instalación dar clic en “Cancel”.



*Figura 55. Ventana para empezar la instalación del programa Geo-Project.*

*Fuente: Asistente de instalación de Geo-Project.*

A continuación, aparecerá esta pantalla (Figura 55), donde se confirmará la instalación con la configuración previamente seleccionada. Dar clic en "Install".

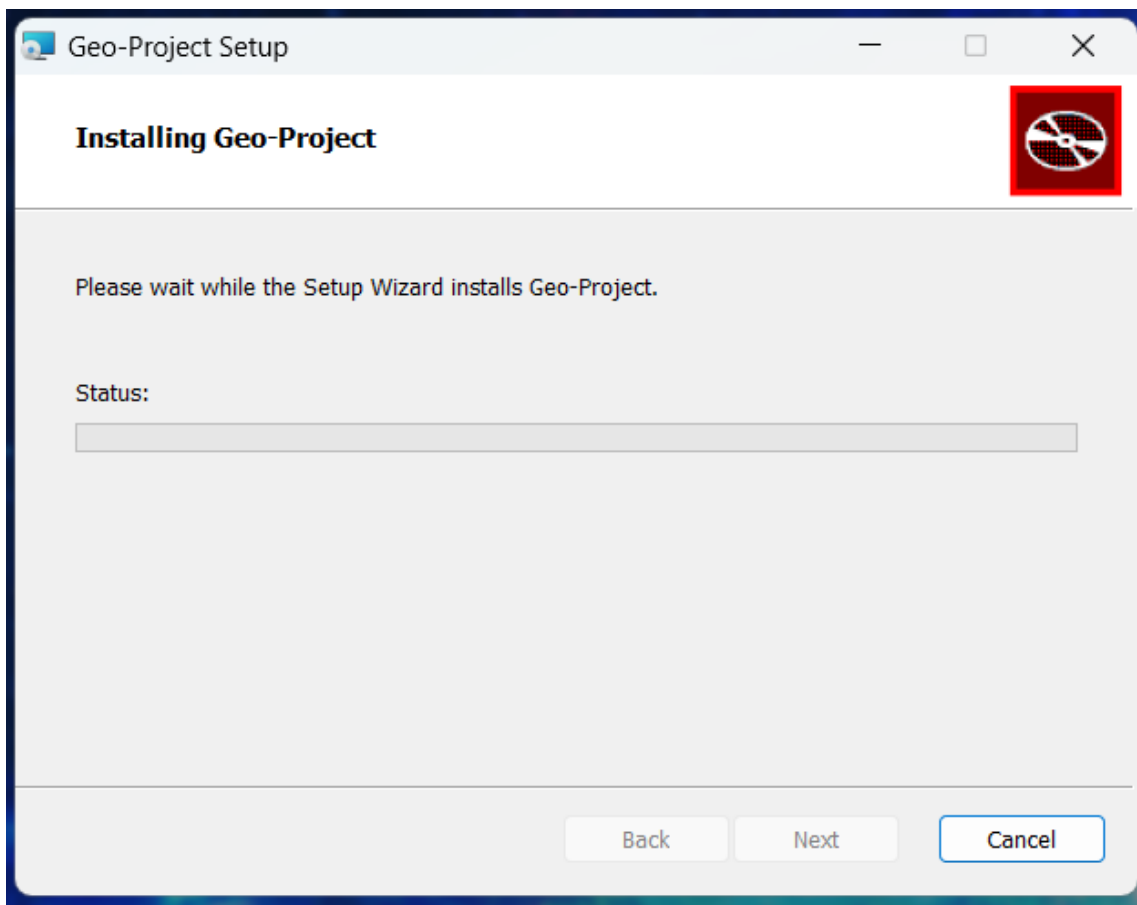


Figura 56. Ventana de progreso de instalación del programa Geo-Project.

Fuente: Asistente de instalación de Geo-Project.

En este momento se pedirá acceso a permisos de administrador donde se dará clic en “Sí” y a continuación se instalará el programa en el computador, esto tardará un par de segundos (Figura 56). Una vez finalizado arrojará la siguiente ventana (Figura 57).

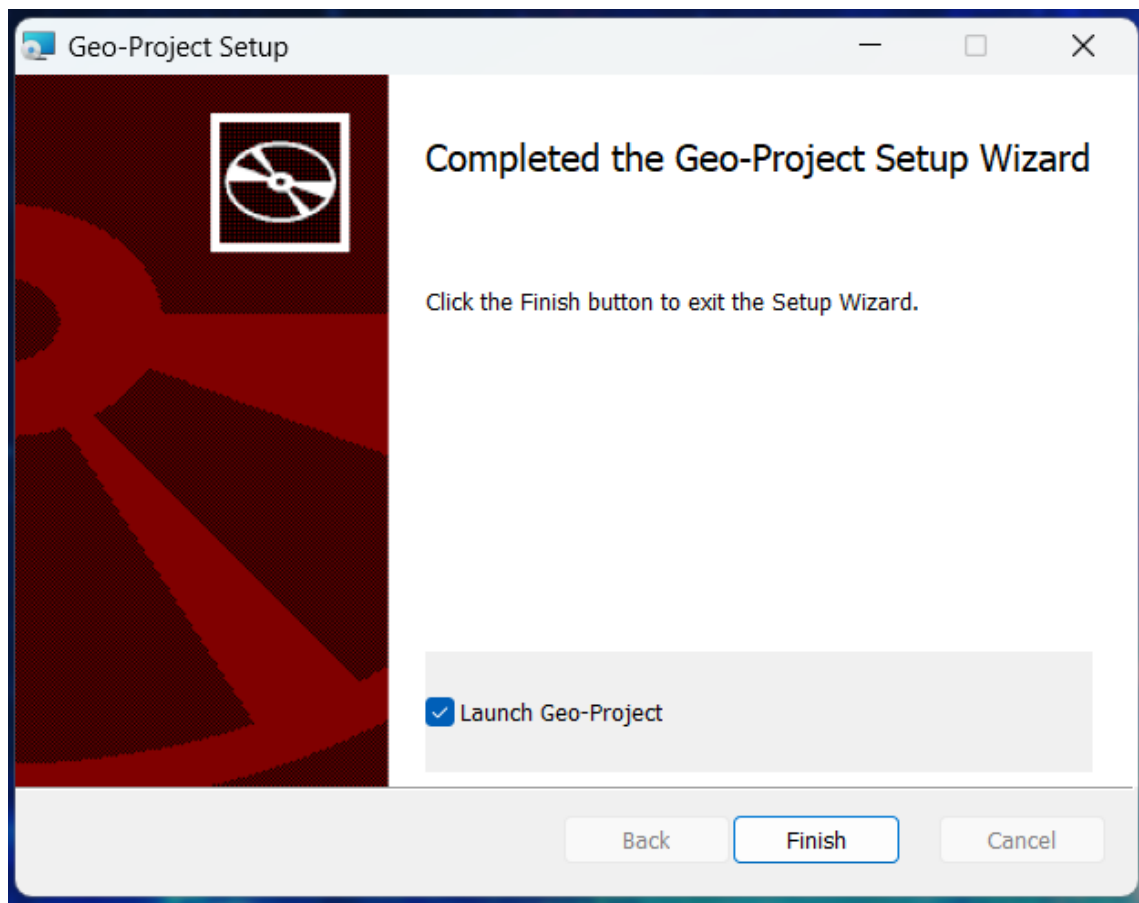


Figura 57. Ventana de finalización de instalación del programa Geo-Project.

Fuente: Asistente de instalación de Geo-Project.

Esta ventana de la figura 57 informa que el programa ha sido instalado con éxito. Si se desea ejecutar el software, debe marcar la opción "Launch Geo-Project" tal y como aparece en la imagen anterior y dar clic en "Finish".

Si no se marcó la opción de ejecutar el software, se puede digitar el nombre "geo-project" en el buscador de Windows (Figura 58) y aparecerá el programa si se instaló correctamente.

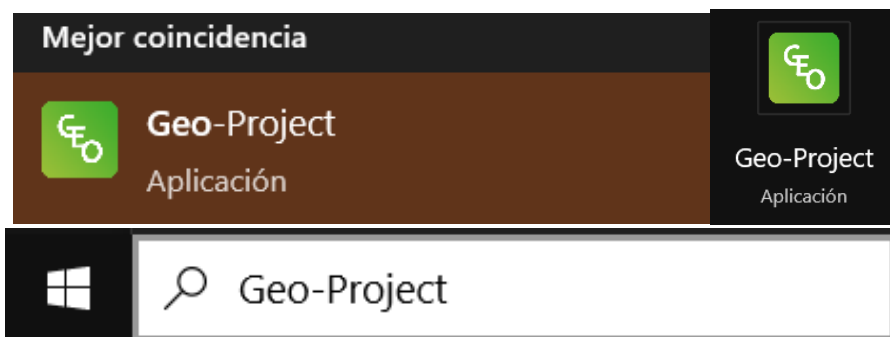


Figura 58. Captura de Windows 11 con la búsqueda del programa Geo-Project.

Fuente: Windows 11.

#### 4.1. Uso del software

Al ingresar al programa se abrirá una ventana de carga de “Geo Project” (Figura 59) y posterior a ello el usuario verá la ventana donde tendrá que ingresar los datos necesarios para el pozo que quiera diseñar (Figura 60).

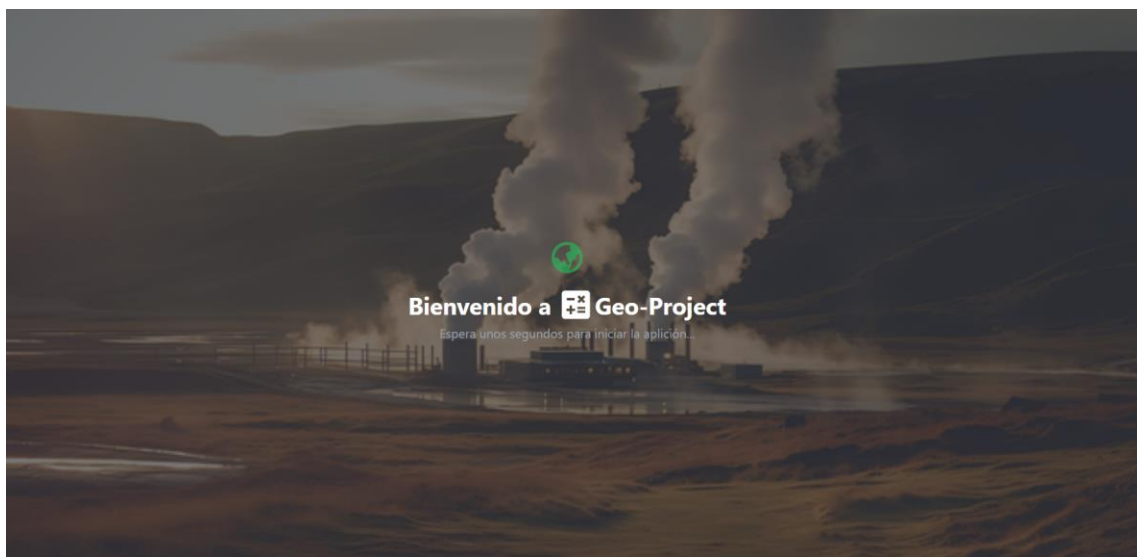


Figura 59. Ventana de carga inicial de Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

### 4.1.1 Ventana de datos de entrada

Formulario

**Datos del Pozo**

\* Tipo de pozo

\* Etapas  
 3 Etapas  
 4 Etapas  
 5 Etapas

---

**Datos Constantes**

Aceleración de la gravedad en la Tierra: 9.81 m/s<sup>2</sup>

**Datos Para el Procedimiento**

\* Nivel de propiedades fisicoquímicas dañinas a las que el pozo estará sometido

\* Profundidad vertical del pozo en metros

\* Flujo másico (kg/s)

\* Coeficiente adiabático del fluido geotérmico

---

Presiones y Densidades del fluido geotérmico

\* Presión en el reservorio en unidades de:  
 Pa  kPa  MPa

\* Densidad en el reservorio en kg/m<sup>3</sup>

\* Presión en superficie en unidades de:  
 Pa  kPa  MPa

\* Densidad en la superficie en kg/m<sup>3</sup>

Aceptar

Reiniciar

Figura 60. Ventana para datos de entrada en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Esta ventana (Figura 60) es la oportunidad del usuario para llenar todas las variables que caracterizan a su pozo. Todas las casillas deben ser completadas para que el programa pueda procesar todos esos datos y dar un resultado correcto. Cabe aclarar que todas las opciones a elegir son excluyentes, es decir, no se puede elegir más de una opción en cada dato.

El primer dato a ingresar es el tipo de pozo (Figura 61) y su forma de selección es por medio de una lista desplegable de la cual se podrá elegir una de las opciones que son: Exploración, Producción o Reinyección.

\* Tipo de pozo

Selecciona un tipo de pozo

Figura 61. Ingreso del tipo de pozo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

El segundo dato será el valor de las etapas del pozo a diseñar (Figura 62), donde se pueden escoger de 3 a 4 etapas en el caso de ser pozo de exploración, o en su defecto, de 4 a 5 etapas en el caso de ser producción o reinyección, ya que estos dos forman parte de los pozos convencionales y su diseño es de la misma manera.

\* Etapas

3 Etapas

4 Etapas

5 Etapas

Figura 62. Ingreso del número de etapas del pozo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Se debe ingresar también el nivel de propiedades fisicoquímicas dañinas a las que el pozo estará sometido, como el nivel de azufre (Figura 63). Los valores a seleccionar pueden ser “alto”, “medio” o “bajo”. Los tres valores están disponibles para todos los tipos de pozos.

\* Nivel de propiedades fisicoquímicas dañinas a las que el pozo estará sometido

Cantidad de azufre, pH, contenido de cloruros, presencia de sílice (SiO<sub>2</sub>), etc ▼

Figura 63. Ingreso del nivel de exposición dañina del pozo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

También se debe ingresar del valor de la profundidad vertical del pozo (Figura 64), este valor debe ser ingresado en metros, sin separación de miles, ni escribir las unidades, es decir, si la profundidad es de mil metros, se va a escribir en la casilla “1000”, incorrectamente sería escribir “1,000”, “1.000”, “1000 m”, “1000 metros” o alguna otra forma diferente a la descrita.

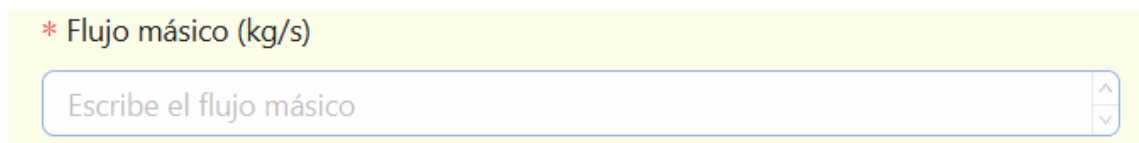
\* Profundidad vertical del pozo en metros

Escribe la profundidad

Figura 64. Ingreso de la profundidad del pozo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

El siguiente valor de entrada es el ingreso del flujo másico (Figura 65). Este indica la cantidad de fluido geotérmico que se desea extraer del pozo, es un valor único para cada pozo ya que depende de sus características y geometría, por lo que se optó por tomarlo como variable de entrada. El valor a ingresar debe ser en kilogramos por segundo (kg/s). Al igual que en el caso de la profundidad y de todos los valores escritos a ingresar en esta ventana, debe de escribirse únicamente el número. Es así como en el caso de desearse 190 kg/s, se debe de escribir en la casilla “190”, sin unidades, ni separación de miles si es el caso de un número de ese orden.



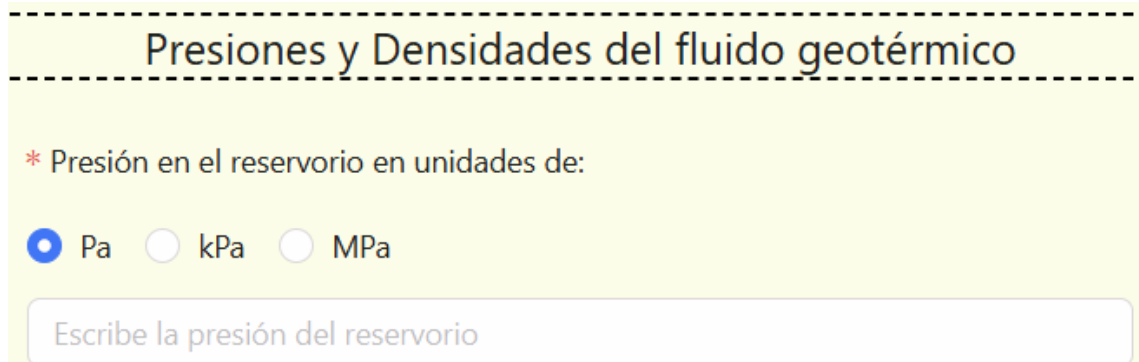
\* Flujo másico (kg/s)

Escribe el flujo másico

Figura 65. Ingreso del flujo másico del pozo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Posteriormente ingrese la presión del fluido geotérmico en el reservorio (Figura 66), la cual debe ingresarse en unidades de megapascal. Es un valor único para cada pozo ya que depende de la naturaleza del fluido geotérmico en el reservorio, por lo que se optó por tomarlo como variable de entrada. Este número puede ser ingresado en tres diferentes tipos de unidades a seleccionar. Repitiendo la indicación de únicamente escribirse el número, mas no las unidades, ni separación de miles. Ejemplo: Para el caso en el que la presión sea de 2 MPa, se debe escribir “2” únicamente.



Presiones y Densidades del fluido geotérmico

\* Presión en el reservorio en unidades de:

Pa  kPa  MPa

Escribe la presión del reservorio

Figura 66. Ingreso de la presión del fluido geotérmico en el reservorio del pozo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

La densidad del fluido geotérmico en el reservorio (Figura 67) en unidades de kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ). Al igual que el anterior apartado, es un valor

único para cada pozo debido a la naturaleza del fluido geotérmico del reservorio. Igualmente solo deben de ingresarse números, mas no unidades. El valor de 50 kg/m<sup>3</sup> se debe de ingresar como “50”.

\* Densidad en el reservorio en kg/m<sup>3</sup>

Figura 67. Ingreso de la densidad del fluido geotérmico en el reservorio del pozo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

El coeficiente adiabático del fluido geotérmico (Figura 68), este valor es adimensional y corresponde a la relación de capacidades caloríficas utilizada en cálculos de energía y flujo en el reservorio. Nuevamente, es un valor único por pozo ya que la naturaleza del fluido geotérmico puede variar entre vapor, líquido o una mezcla de ambos, esto varía su coeficiente adiabático, por esta razón es variable de entrada.

\* Coeficiente adiabático del fluido geotérmico

Figura 68. Ingreso del coeficiente adiabático del fluido geotérmico del pozo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

La presión del fluido geotérmico en la superficie (Figura 69) puede variar dependiendo de la zona donde se encuentre, puede ingresarse el valor de una atmósfera (1 atm), debido a que es la referencia estándar para la presión atmosférica, lo cual equivale a 101 325 Pa. Este número puede ser ingresado en tres diferentes tipos de unidades a seleccionar. Es importante recordar que no se deben ingresar unidades al escribir el valor.

\* Presión en superficie en unidades de:

Pa    kPa    MPa

Escribe la presión de la superficie

Figura 69. Ingreso de la presión del fluido geotérmico en la superficie del pozo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

La densidad del fluido geotérmico en la superficie (Figura 70) depende de la composición de dicho fluido, su valor debe ingresarse en unidades de kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ). Recordando que no se deben ingresar unidades.

\* Densidad en la superficie en  $\text{kg/m}^3$

Escribe la densidad de la superficie

Figura 70. Ingreso de la densidad del fluido geotérmico en la superficie del pozo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Cabe mencionar que todos los números que presenten decimales deben de escribirse separando los decimales con punto, no con coma, por ejemplo números como “cuatro con cincuenta y uno” se debe de escribir “4.51” y no “4,51”.

Además de los datos que se permiten ingresar, existen otros constantes que son necesarios para el procesamiento adecuado (Figura 71). Como el caso de la aceleración de la gravedad en la Tierra tomada como  $9.81 \text{ m/s}^2$ , ya que es el valor promedio basado en mediciones en la superficie de la Tierra y es por excelencia el valor adoptado en ingeniería.

## Datos Constantes

---

**Aceleración de la gravedad en la Tierra: 9.81 m/s<sup>2</sup>**

*Figura 71. Constante de la aceleración de la gravedad utilizada para calcular en Geo-Project.*

*Fuente: Geo-Project.*

Una vez lleno con todos los datos requeridos, se debe proceder a dar clic en “Aceptar” (Figura 72).

A rectangular button with rounded corners, colored green, containing the word "Aceptar" in white text.

*Figura 72. Botón para aceptar el inicio del cálculo del diseño del pozo en Geo-Project.*

*Fuente: Geo-Project.*

Si se desea borrar los datos ingresados hasta ese momento para depositar otros, se puede dar clic en “Reiniciar” (Figura 73).

A rectangular button with rounded corners, colored red, containing the word "Reiniciar" in white text.

*Figura 73. Botón para reiniciar el ingreso de parámetros en Geo-Project.*

*Fuente: Geo-Project.*

Por último, cabe mencionar que existe un botón de ayuda en la parte superior de la ventana de ingreso de datos. Su forma es la de un signo de interrogación tal y como se muestra en la figura 74.



*Figura 74. Botón de ayuda en Geo-Project.*

*Fuente: Geo-Project.*

Al presionar este botón se desplegará una ventana (Figura 75) con advertencias a tomar en cuenta a la hora de ingresar datos en los parámetros de entrada.

## ⚠️ ADVERTENCIAS ⚠️

Este formulario está diseñado para el ingreso de parámetros técnicos. Asegúrese de ingresar datos precisos y coherentes para obtener resultados correctos.

### **Longitud mínima:**

Dependiendo del número de etapas seleccionadas, la longitud debe cumplir las siguientes condiciones mínimas:

- 600 metros para 3 etapas.
- 800 metros para 4 etapas.
- 1000 metros para 5 etapas.

Si se ingresan valores menores a los mínimos, el programa no permitirá los cálculos; valores excesivamente altos o ilógicos también pueden generar errores.

**Presiones:** Tenga cuidado al seleccionar la unidad adecuada. Asegúrese de indicar la presión en Pascales, Kilopascales o Megapascales, según corresponda.

Verifique que todos los campos estén correctamente completados antes de proceder.

-Geo-Project

Cerrar

Figura 75. Tabla de ayuda al usuario del programa Geo-Project

Fuente: Geo-Project.

### 4.1.2 Ventana de resultados

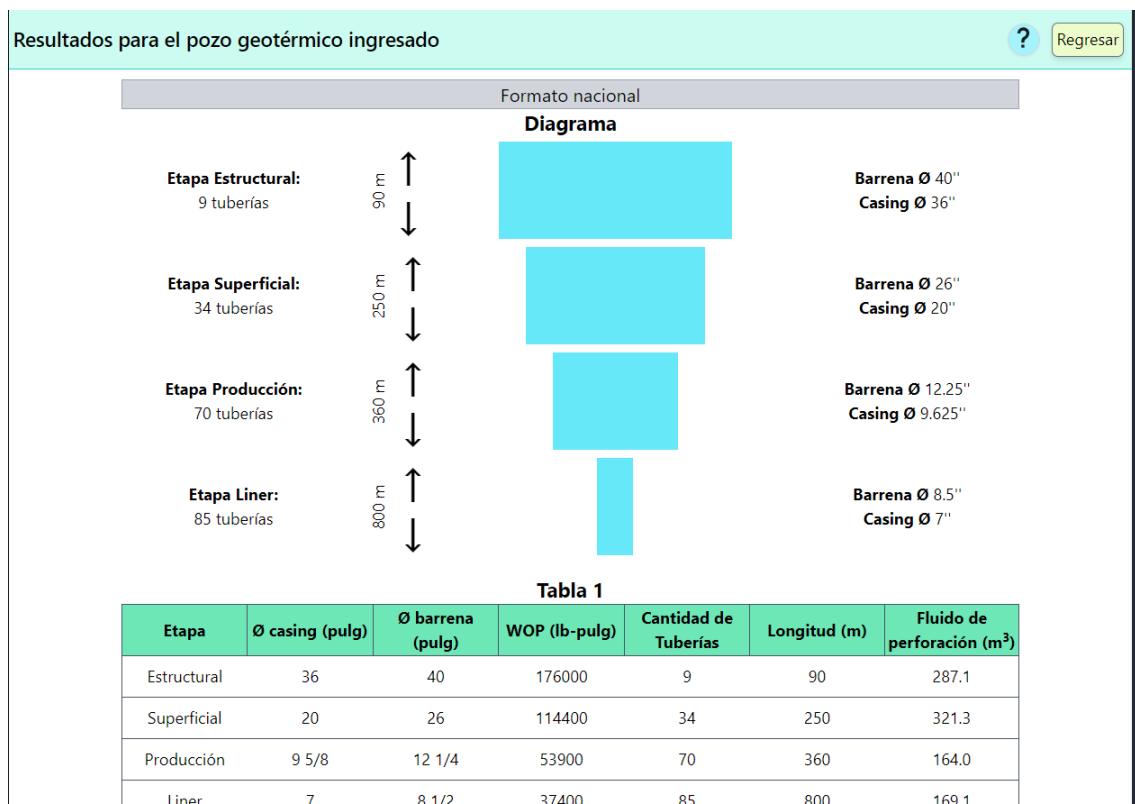


Figura 76. Captura parcial de la ventana de resultados en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Los resultados varían dependiendo de la elección del tipo de pozo. Si se elige pozo exploratorio, los resultados serán procesados con base al método nacional (Figura 76). Por otro lado, si se elige tanto el de producción como el de reinyección, los cuales conforman los pozos convencionales, se tendrá un apartado más. Esto se origina debido a que los pozos convencionales se solucionan con base a dos tipos de métodos de selección de diámetros de barrena y diámetros de tuberías de revestimiento, puesto que estos son los

primeros parámetros a seleccionar en el proceso, generan que todos los resultados posteriores cambien debido a ello, es por esto que se hace la distinción de ambos métodos y se muestran uno seguido del otro para que el usuario compare entre las dos soluciones. Los dos tipos de métodos con los que se soluciona el diseño de los pozos convencionales (producción y reinyección) son el método nacional (Figura 77) y método normado por la API (Figura 78).

Formato nacional

*Figura 77. Indicador de resultados producto del método nacional en Geo-Project.*

*Fuente: Geo-Project.*

Formato normado

*Figura 78. Indicador de resultados producto del método normado en Geo-Project.*

*Fuente: Geo-Project.*

Por otra parte, los resultados que se obtienen en el software se visualizan de dos formas: Expuestos en ilustraciones y a través de tablas. Esto es así porque si todo se quisiera presentar en forma ilustrativa, se saturaría el gráfico, es por eso que se tomó la decisión de separar la información resultante.

En la figura 79 únicamente se toman las principales variables, las cuales son: El valor de los diámetros de barrena y tubería de revestimiento (casing), la longitud de las tuberías por cada etapa, las etapas que están participando en el pozo y la cantidad de tuberías necesarias para completar la longitud de cada etapa.

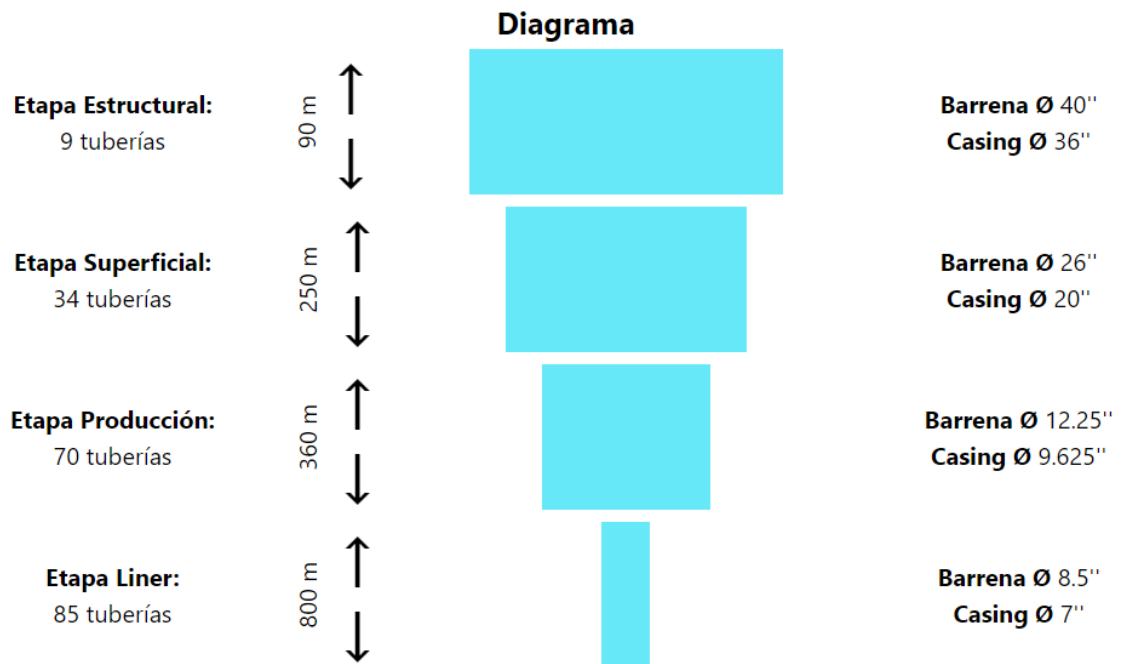


Figura 79. Diagrama de la ventana de resultados en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Mientras que, en tablas (figura 80 y 81) se presenta tanto esta información que está en el dibujo, como los nuevos resultados que son: El peso sobre barrena (WOB), la cantidad en volumen del fluido de perforación a utilizar tanto por cada etapa como para todo el pozo en su totalidad, asimismo la longitud total del pozo para comprobar que los valores por cada etapa resultan el ingresado por el usuario.

**Tabla 1**

| Etapa                        | Ø casing (pulg) | Ø barrena (pulg) | WOP (lb-pulg) | Cantidad de Tuberías | Longitud (m) | Fluido de perforación (m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------------|--------------|---|
| Estructural                  | 36              | 40               | 176000        | 9                    | 90           | 287.1                                   |
| Superficial                  | 20              | 26               | 114400        | 34                   | 250          | 321.3                                   |
| Producción                   | 9 5/8           | 12 1/4           | 53900         | 70                   | 360          | 164.0                                   |
| Liner                        | 7               | 8 1/2            | 37400         | 85                   | 800          | 169.1                                   |
| Valores totales para el pozo |                 |                  |               | 198                  | 1500         | 941.5                                   |

*Figura 80. Captura de la Tabla 1 de la ventana de resultados en Geo-Project.*

*Fuente: Geo-Project.*

Sin embargo, existe una peculiaridad con respecto a las tablas de resultados, ya que no se trata de únicamente una, sino dos tablas. Esto debido a que se decidió separar los valores propios de la cementación, es así como la segunda tabla que se muestra al usuario es la que conlleva todos estos datos como la cantidad en volumen para la cementación, tomando en cuenta sus unidades en litros como en barriles. Asimismo, se detallan los sacos que debe llevar por cada uno de los materiales que representan la mezcla cementante, como lo son el cemento, sílica, aditivos y el volumen de agua por unidad de volumen.

**Tabla 2**

| Etapas              | Cementación |       |
|---------------------|-------------|-------|
|                     | Litros      | BBL   |
| Estructural         | 27726.6     | 174.4 |
| Superficial         | 69924.6     | 439.8 |
| Producción          | 20948.9     | 131.8 |
| Liner               | 18849.2     | 118.5 |
| Valores<br>totales: | 137449.3    | 864.5 |

Sacos de cemento H: **3195**

Sacos de sílica: **2103**

Sacos de dispersante: **13**

Volumen de agua - Litro: **75778.0**

Volumen de agua - BBL: **477**

Figura 81. Captura de la Tabla 2 de la ventana de resultados en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Al final de los resultados se muestra un comentario (Figura 82) sobre qué materiales de casing son mejores para cada etapa dependiendo del contenido dañino para el acero de las tuberías de producción, el cual varía según el contenido sea alto, medio o bajo. Esto se muestra en forma de comentario ya que cambia según el criterio de cada diseñador, sin embargo, la ayuda que se presenta en el software está basada en detallar los tipos de aceros que funcionan mejor para cada tipo de exposición de contenido dañino. Este resultado es tanto para la selección por método nacional como por selección normada.

**ALTA EXPOSICIÓN A PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DAÑINAS:** Los aceros de grado N-80, L-80, C-90, C-95, T-95, P-110 y Q-125 son (en orden ascendente) los materiales que poseen mejores propiedades ante un ambiente con grandes cantidades de parámetros dañinos que provoquen corrosión en las tuberías de revestimiento.

Figura 82. Captura de la sugerencia final de la ventana de resultados en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.



*Figura 83. Botón de ayuda en Geo-Project.*

*Fuente: Geo-Project.*

Agregado a la ventana de resultados, se posee otro botón de ayuda (Figura 83), el cual brindará algunas aclaraciones extra para la interpretación de los resultados, acceder a esta opción mostrará la tabla de notas del desarrollador (Figura 84), en la que se dan algunas especificaciones sobre los resultados, siendo tanto las presentaciones de sacos que se tomaron en cuenta para los cálculos, como ayudar a la interpretación de los resultados en los diagramas, y otras aclaraciones.

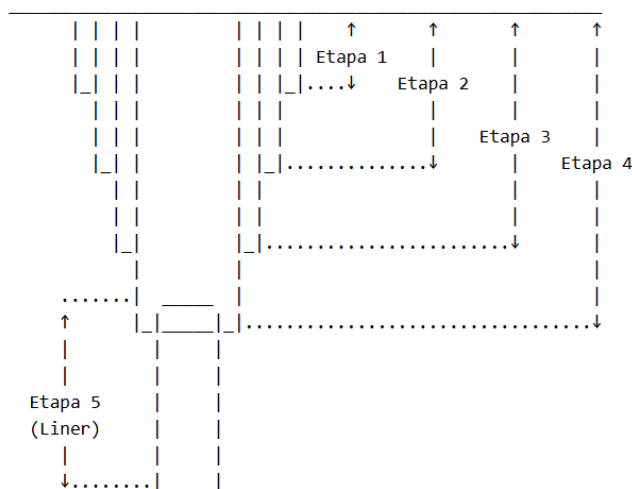
## NOTAS DEL DESARROLLADOR

La presentación de sacos es la siguiente:

- **Cemento H: 94 lb/sac**
- **Silica y Dispersantes: 50 lb/sac**

En las etapas superiores al liner, las tuberías se extienden desde la superficie, por ello, el número acumulativo de tuberías responde a esta configuración, siendo la etapa del liner la única excepción.

Este detalle se ilustra en el siguiente diagrama:



Esto aplica para todos los tipos de pozos, omitiendo únicamente las etapas que no correspondan en caso de que el pozo tenga menos de cinco etapas.

En el caso del **Liner**, es importante destacar que cuenta con cinco tuberías adicionales, como se observa en el diagrama, el Liner se encuentra dentro de la etapa de producción, funcionando como un método de anclaje, esto solo afecta la cantidad de tuberías a instalar en dicha etapa.

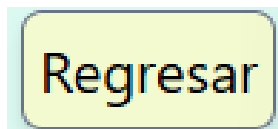
**importante:** Si los diámetros son iguales a cero o existen datos vacíos, sin información o similares, significa que el pozo no puede ser diseñado mediante este método con las tablas y parámetros establecidos por el usuario y la base de datos de la aplicación.

Cerrar

*Figura 84. Tabla de notas del desarrollador del programa Geo-Project*

*Fuente: Geo-Project.*

También en la parte superior se encuentra un botón para regresar a la ventana de datos de entrada, como el mostrado en la figura 85, para calcular otro pozo.



*Figura 85. Botón para calcular otro diseño de pozo en Geo-Project.*

*Fuente: Geo-Project.*

#### **4.1. Interpretación de resultados**

Para poder explicar de la mejor forma cómo interpretar los resultados obtenidos, se hará abordando el problema tipo que se desarrolló manualmente en el capítulo 2 de este documento.

Se empieza ingresando los mismos parámetros de entrada que se presentaron en el enunciado de dicho problema, como se muestra en la figura 86.

Formulario

### Datos del Pozo

\* Tipo de pozo

\* Etapas  
 3 Etapas  
 4 Etapas  
 5 Etapas

---

### Datos Constantes

Aceleración de la gravedad en la Tierra: 9.81 m/s<sup>2</sup>

### Datos Para el Procedimiento

\* Nivel de propiedades fisicoquímicas dañinas a las que el pozo estará sometido

\* Profundidad vertical del pozo en metros

\* Flujo másico (kg/s)

\* Coeficiente adiabático del fluido geotérmico

---

Presiones y Densidades del fluido geotérmico

---

\* Presión en el reservorio en unidades de:  
 Pa  kPa  MPa

\* Presión en superficie en unidades de:  
 Pa  kPa  MPa

\* Densidad en el reservorio en kg/m<sup>3</sup>

\* Densidad en la superficie en kg/m<sup>3</sup>

Aceptar

Reiniciar

Figura 86. Ventana con datos de entrada del problema tipo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Seleccionando para un tipo de pozo de producción que posee 4 etapas, con un nivel de exposición dañina alta, una profundidad de 1 500 metros verticalmente hasta el reservorio, deseando extraer 190 kg/s de flujo másico del vapor geotérmico que presenta a su vez un coeficiente adiabático de 1.33, donde la presión y densidad del vapor en la superficie es de 101 325 Pa y 24.670 kg/m<sup>3</sup> respectivamente, mientras que su presión y densidad en el reservorio es de 2 MPa y 50 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

Teniendo todos los datos ingresados, se procede a dar clic en "Aceptar". Como el pozo ingresado es del tipo orientado a la producción geotérmica, los resultados

arrojados serán producto de los dos métodos de selección, empezando con el método en formato nacional (Figura 87).

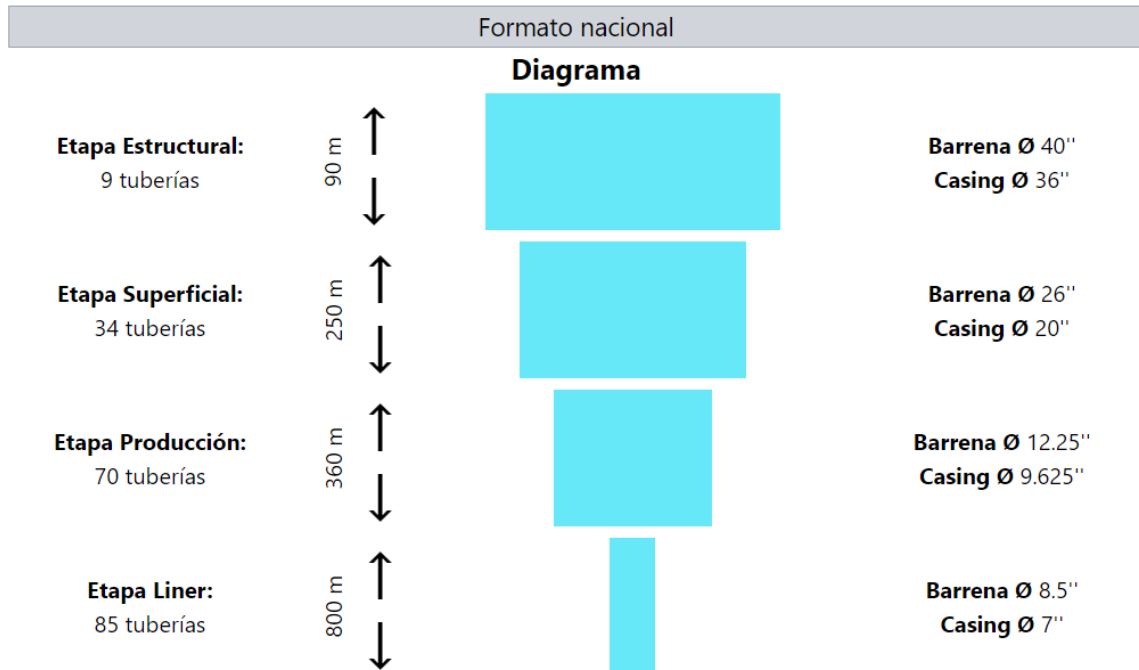


Figura 87. Diagrama de la resolución por el método nacional del pozo del problema tipo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Esta figura 87 representa el pozo con sus cuatro etapas, cada una con su respectivo nombre, diámetro de barrena en pulgadas, diámetro de tubería de revestimiento o casing en pulgadas, longitud de dicha etapa en metros y cuántas tuberías son necesarias para completar dicha longitud. Todo esto calculado con el método nacional.

**Tabla 1**

| Etapa                        | Ø casing (pulg) | Ø barrena (pulg) | WOP (lb-pulg) | Cantidad de Tuberías | Longitud (m) | Fluido de perforación (m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------------|--------------|---|
| Estructural                  | 36              | 40               | 176000        | 9                    | 90           | 287.1                                   |
| Superficial                  | 20              | 26               | 114400        | 34                   | 250          | 321.3                                   |
| Producción                   | 9 5/8           | 12 1/4           | 53900         | 70                   | 360          | 164.0                                   |
| Liner                        | 7               | 8 1/2            | 37400         | 85                   | 800          | 169.1                                   |
| Valores totales para el pozo |                 |                  |               | 198                  | 1500         | 941.5                                   |

Figura 88. Captura de los resultados de la tabla 1 con el método nacional del pozo del problema tipo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Debajo del diagrama anterior está ubicada la “tabla 1 nacional” (Figura 88), esta contiene de nuevo el diámetro del casing, diámetro de barrena, longitud y cantidad de tuberías, pero agregado a ello está el peso sobre barrena (WOB) de cada etapa y la cantidad de volumen del fluido de perforación a utilizar en cada etapa. Es así como se lee que para la etapa estructural el diámetro de casing es de 36 pulgadas, el diámetro de barrena es 40 pulgadas, su respectivo WOB es de 176 000 lb-pulg, para una longitud de 90 metros se deben usar 9 tuberías de 10 metros cada una y para cavar el orificio de la etapa estructural con dicha barrena de 36 pulgadas se necesitan 287.1 metros cúbicos de fluido de perforación. De la misma manera se leen para las siguientes etapas. Como totalidad se tiene que la cantidad de tuberías a usar para todo el pozo es de 150, lo que cubre 1 500 metros de longitud del pozo total (de acuerdo a lo ingresado en los datos de entrada) y un volumen total de fluido de perforación de 941.5 metros cúbicos para la totalidad del pozo. Valores que concuerdan con los obtenidos en el capítulo 2.

**Tabla 2**

| Etapas           | Cementación |       |
|------------------|-------------|-------|
|                  | Litros      | BBL   |
| Estructural      | 27726.6     | 174.4 |
| Superficial      | 69924.6     | 439.8 |
| Producción       | 20948.9     | 131.8 |
| Liner            | 18849.2     | 118.5 |
| Valores totales: | 137449.3    | 864.5 |

Sacos de cemento H: **3195**

Sacos de sílica: **2103**

Sacos de dispersante: **13**

Volumen de agua - Litro: **75778.0**

Volumen de agua - BBL: **477**

Figura 89. Captura de los resultados de la tabla 2 con el método nacional del pozo del problema tipo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Posterior a la “tabla 1” se presenta la “tabla 2 nacional” (Figura 89), en ella se visualizan los datos de volúmenes correspondientes para la lechada de cementación a utilizar por cada etapa, tanto en litros como en barriles. Es así como para la etapa estructural, se necesitan 27 726 litros de lechada cementante, lo que son 174 barriles, además, 3 195 sacos de cemento H, 2103 sacos de sílica, 13 sacos de dispersantes y un total de 75 778 litros de agua, que en barriles son 477. Valores que concuerdan con los obtenidos en el capítulo 2.

En este punto concluye todo lo relacionado con el método nacional. Las siguientes tablas e ilustración tratan sobre los resultados con el método normado.

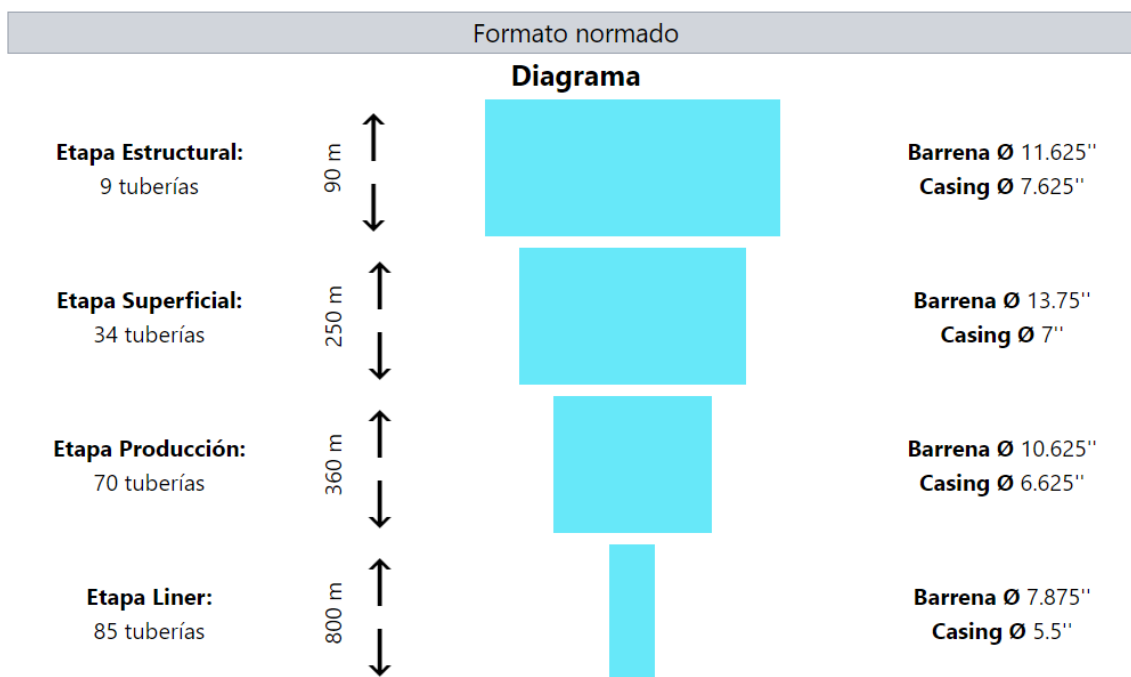


Figura 90. Diagrama de la resolución por el método normado del pozo del problema tipo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

El diagrama respectivo para este método (Figura 90) al igual que para el nacional, muestra los mismos parámetros pero con los valores acordes a los normados para los diámetros de las tuberías y barrenas, las longitudes y cantidad de tuberías son los mismos que en el nacional.

Los valores de la "tabla 1" se mantienen iguales para las cantidades de tuberías y longitudes igualmente.

**Tabla 1**

| Etapa                        | Ø casing (pulg) | Ø barrena (pulg) | WOP (lb-pulg) | Cantidad de Tuberías | Longitud (m) | Fluido de perforación (m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------------|--------------|---|
| Estructural                  | 7 5/8           | 11 5/8           | 51150         | 9                    | 90           | 106.6                                   |
| Superficial                  | 7               | 13 3/4           | 60500         | 34                   | 250          | 154.7                                   |
| Producción                   | 6 5/8           | 10 5/8           | 46750         | 70                   | 360          | 145.6                                   |
| Liner                        | 5 1/2           | 7 7/8            | 34650         | 85                   | 800          | 157.9                                   |
| Valores totales para el pozo |                 |                  |               | 198                  | 1500         | 564.9                                   |

Figura 91. Captura de los resultados de la tabla 1 con el método normado del pozo del problema tipo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Los diámetros de la figura 91 son los respectivos de la norma API. El peso sobre barrena (WOB) y el volumen de fluido de perforación son calculados respecto a los diámetros normados por lo que difieren con el método nacional. En este caso la etapa estructural, por ejemplo, presenta un diámetro de casing de 7 5/8 de pulgada, diámetro de barrena de 11 5/8 de pulgada, un WOB de 51 150 lb-pulg y 106.6 metros cúbicos de volumen de fluido de perforación para esa etapa. Igual se pueden leer para las siguientes etapas. Mientras que los valores totales para la cantidad de tuberías de todo el pozo son de 198 tuberías, la longitud total se observa que concuerda con los 1 500 metros ingresados por el usuario y el volumen del fluido de perforación para todo el pozo será de 564.9 metros cúbicos. Valores que concuerdan con los obtenidos en el capítulo 2.

**Tabla 2**

| Etapas           | Cementación |       |
|------------------|-------------|-------|
|                  | Litros      | BBL   |
| Estructural      | 7022.9      | 44.2  |
| Superficial      | 35484.8     | 223.2 |
| Producción       | 25172.9     | 158.3 |
| Liner            | 25753.0     | 162.0 |
| Valores totales: | 93433.6     | 587.6 |

Sacos de cemento H: **2172**

Sacos de sílica: **1430**

Sacos de dispersante: **9**

Volumen de agua - Litro: **51514.8**

Volumen de agua - BBL: **324**

Figura 92. Captura de los resultados de la tabla 2 con el método normado del pozo del problema tipo en Geo-Project.

Fuente: Geo-Project.

Con respecto a la “tabla 2 normada” (Figura 92) donde se muestran los datos de la cementación, los valores para la etapa estructural son de 7 022.9 litros, lo cual se traduce en 44.2 barriles, y así se pueden leer para las siguientes etapas. Mientras que los sacos de cemento son 2 172, sacos de sílica 1430, sacos de dispersante 9 y el volumen de agua a agregar en litros es de 51 514.

Para finalizar con la ventana de resultados, se muestra el mensaje (Figura 93) correspondiente a los grados de aceros que se pueden utilizar para este caso que se trata de un pozo con alto contenido de exposición a propiedades dañinas. En él se lee que los aceros de grado N-80, L-80, C-90, C-95, T-95, P-110 y Q-125 son (en orden ascendente) los materiales que poseen mejores propiedades ante un ambiente con grandes cantidades de parámetros dañinos que provoquen corrosión en las tuberías de revestimiento. Esto sugiere que, si se quieren seleccionar materiales, los de las etapas más cercanas al reservorio deben de tener mayor resistencia en su acero, para ello los mejores grados son los últimos mencionados ya que van en orden ascendente de propiedades mecánicas.

Mientras que los que están más lejos del reservorio pueden utilizar los aceros mencionados primero ya que si bien presentan muy buenas propiedades ante la corrosión, no estarán en contacto crítico con ese ambiente, así que no es necesario tener las mejores propiedades mecánicas.

**ALTA EXPOSICIÓN A PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DAÑINAS:** Los aceros de grado N-80, L-80, C-90, C-95, T-95, P-110 y Q-125 son (en orden ascendente) los materiales que poseen mejores propiedades ante un ambiente con grandes cantidades de parámetros dañinos que provoquen corrosión en las tuberías de revestimiento.

*Figura 93. Sugerencia para materiales del casing del pozo del problema tipo en Geo-Project.*

*Fuente: Geo-Project.*

## **Capítulo 5. Presupuesto de desarrollo del software**

Durante el desarrollo del software, se incurrió en una serie de gastos necesarios para llevar a cabo las distintas etapas del desarrollo del proyecto, estos costos abarcan tanto recursos digitales y servicios, así como otros elementos indispensables para garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados para la investigación. Para su fácil comprensión y visualización, se ha realizado un desglose detallado de dichos gastos con el fin de proporcionar una visión clara y precisa de la inversión requerida, presentado en las tablas 43 y 44, donde se enumeran y describen de manera específica los distintos rubros que conforman el total de los costos asociados al desarrollo del software.

Las tablas están divididas entre los gastos directos que se asumieron para el software que se describen en la tabla 43, siendo estos softwares y servicios para programación y gastos indirectos y otros importantes descritos en la tabla 44.

Tabla 43. Primera parte de presupuesto del proceso de desarrollo de software Geo-Project y gastos incurridos en esta investigación

| Ítem                                  | Descripción   | Veces/Meses Pagado (en caso de suscripción) | Precio Unitario (\$) | Costo Total (\$) | Notas  |
|---------------------------------------|---|---|----------------------|------------------|--|
| <b>Cursos de Programación</b>         | Formación en desarrollo de aplicaciones, frontend, backend y bases de datos         | 1   | \$47.97              | \$47.97          | Master en JavaScript: Aprender JS, jQuery, Angular, NodeJS |
| <b>Miro</b>                           | Herramienta colaborativa para diagramación y planificación                          | 9   | \$8.00               | \$72.00          | Plan individual starter                                    |
| <b>Excalidraw</b>                     | Herramienta de diseño de interfaces y prototipos                                    | 9   | \$6.00               | \$54.00          | Plan Plus  |
| <b>Servicio de Hosting (Servidor)</b> | Hosting de base de datos y aplicación web, siendo seleccionados Hostinger y netifly | 2   | \$32.00              | \$64.00          | Plan premium<br>Plan Pro                                   |
| <b>Figma</b>                          | Diseño de interfaces de usuario   | 2   | \$15.00              | \$30.00          | Suscripción de equipo profesional                          |
| <b>Licencia de Microsoft Office</b>   | Uso de herramientas de Office para documentación y presentaciones                   | 1   | \$84.99              | \$84.99          | Licencia anual   |

Tabla 44. Segunda parte de presupuesto del proceso de desarrollo de software Geo-Project y gasto incurridos en esta investigación

| Ítem                        | Descripción  | Veces/Meses Pagado<br>(en caso de suscripción) | Precio Unitario (\$) | Costo Total (\$)  | Notas                         |
|-----------------------------|--|--|----------------------|-------------------|-------------------------------|
| <b>Gastos de Internet</b>   | Conexión a internet durante el desarrollo del proyecto | 12   | \$17.00              | \$204.00          | Plan mensual personal         |
| <b>Gastos de Transporte</b> | Desplazamientos para defensas y consultas              | 10   | \$5.00               | \$50.00           | Estimado                      |
| <b>Contingencias</b>        | Reserva para imprevistos (10% del total)               | 1  | \$84.20              | \$84.20           | Fondo de seguridad            |
| <b>Horas Hombre</b>         | Tiempo de desarrollo de la investigación por persona   | 8  | \$1,000.00           | \$8,000.00        | Salario habitual <sup>5</sup> |
| <b>Total:</b>               |  |  |                      | <b>\$8,726.16</b> |                               |

<sup>5</sup> El salario habitual considerado para el país de El Salvador, para un programador junior de páginas web, consultado en diversas fuentes de empleo.

## **Conclusiones**

El desarrollo del software educativo propuesto en esta investigación ha permitido la creación de una herramienta interactiva que facilita el diseño de pozos geotérmicos de exploración, producción y reinyección, cabe mencionar que a lo largo del proyecto, se cumplió con la recopilación y análisis de los procedimientos para el diseño de estos pozos, lo que permitió establecer los parámetros esenciales tanto de entrada como de salida necesarios para su correcto dimensionamiento, además, se implementaron módulos que permiten realizar cálculos precisos sobre el perfil del pozo y sus características, proporcionando a los usuarios información clave para el diseño, también se ha integrado bases de datos con información relevante para el correcto diseño de los pozos, permitiendo que los estudiantes obtengan información confiable para la toma de decisiones.

Se elaboraron documentos y guías didácticas que facilitan la comprensión de la instalación y uso del software, asegurando que de esta forma pueda integrarse en entornos educativo.

El software fue sometido a diversas pruebas iterativas para verificar su correcto funcionamiento, garantizando su fiabilidad y precisión en los cálculos, el software está limitado a los estudios realizados para el diseño de pozos de exploración, reinyección y producción redactados en este documento, sin embargo, el potencial del software va más allá, con la oportunidad de brindar una herramienta nunca antes vista, con todas las funcionalidades necesarias para la automatización del diseño de pozos geotérmicos, de la forma más óptima, con datos confiables y márgenes de errores reducidos, además de facilitar posibles decisiones profesionales.

## Sugerencias

Poner opciones en las que se pueda ingresar diferentes tipos de unidades, es decir, uno elige la unidad que quiera ingresar, así se expande la agilidad del programa.

En los resultados poner una tabla con todos los grados de aceros junto con sus propiedades mecánicas para que el usuario pueda tener esa información adicional a la hora de leer cuales materiales son mejores para su caso.

Poner un botón para buscar otra posible respuesta, ya que en la sección de diámetros normados para la barrena existen más valores posibles para tomar, pero en este caso se decidió por fijar en que tomara el valor mayor de diámetro de barrena.

Agregar información sobre los estratos del suelo para que con ayuda de esa información se pueda elegir tipo de barrena según su código IADC.

En el proceso de calcular cuánto volumen de fluido de perforación se va a necesitar, ampliar esta información con aditivos necesarios para diferentes condiciones de perforación.

Ingresar una base de datos de precios de todas las herramientas, equipos y utilidades que forman parte del diseño del pozo geotérmico, esta base puede ser adaptada a un país y una moneda en específico o con la posibilidad de brindarle al usuario la oportunidad de que él propiamente ingrese los valores monetarios de su entorno.

En el software únicamente se hace referencia al cemento H, sin embargo, se puede agregar más información respecto a otros tipos de cemento para una aplicación más enriquecida en cuestión de opciones de diseño.

En el cálculo de diámetros para pozo exploratorio, se podrían agregar más soluciones posibles que las que se programaron, ya que el algoritmo está diseñado para que seleccione entre dos valores, un máximo y un mínimo, por lo que se podría rediseñar para que escoja también valores entre ese rango, aumentando la diversidad de respuestas.

El formato en el que se imprimen los diámetros que sea de forma Unicode, acorde al uso comercial de las pulgadas.

## Referencias Bibliográficas u Otras Fuentes

Bourgoyne, A. T. Jr., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young, F. S. Jr. (1986). Applied drilling engineering (Vol. 2). Society of Petroleum Engineers.

Parada, L. F. A., Cajas Maldonado, C., Orellana Mejía, M. J., & Taco Tenelanda, E. (2015). Propuestas de diseño para la perforación de pozos exploratorios (Tesis de diplomado). Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Unidad de Postgrados.

Obregón Delgado, N. F. (2014). Herramientas de perforación en pozos geotérmicos. Universidad Industrial de Santander. Recuperado de <https://noesis.uis.edu.co/bitstreams/04a4fda8-545d-4a94-b28b-8f1d16636ce3/download>.

Juárez Ortega, R. I. (2014). Procesos de perforación y terminación de pozos geotérmicos. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3579/tesis.pdf?sequence=1>.

Geinor. (s.f.). ¿Qué son las perforaciones geotérmicas? Recuperado de <https://www.geinor.com/perforaciones-geotermicas/>.

Ghasemloonia, A., Rideout, G., & Butt, S. (s. f.). The effect of weight on bit on the contact behavior of drillstring and wellbore. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/220953962\\_The\\_effect\\_of\\_weight\\_on\\_bit\\_on\\_the\\_contact\\_behavior\\_of\\_drillstring\\_and\\_wellbore](https://www.researchgate.net/publication/220953962_The_effect_of_weight_on_bit_on_the_contact_behavior_of_drillstring_and_wellbore)

Engineers Got Talent. (2017, abril 15). #11 Rotating Equipment, Mast and Substructure [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=lck7pi17xJ4>

Traffic\_analyzer. (2016, 6 de mayo). Fracking [Ilustración vectorial]. iStock. Recuperado de <https://www.istockphoto.com/vector/fracking-gm528308492-92945283>

Drilling Manual. (2024, 19 de febrero). Drill string components guide in oil & gas. Recuperado de <https://www.drillingmanual.com/drill-string-overview/>

Ing. Peter. (s. f.). Inicio de perforación con rotación con lodo [Video]. YouTube Shorts. <https://www.youtube.com/shorts/6M-ljMZEGFI>

Rigzone. (s. f.). How do drilling fluids work? Recuperado de [https://www.rigzone.com/training/insight?insight\\_id=291&c\\_id=](https://www.rigzone.com/training/insight?insight_id=291&c_id=)

OilGasWiki. (2022, junio 26). Drilling fluids. Recuperado de <https://www.oilgaswiki.com/2022/06/drilling-fluids.html>

Solomatemáticas. (2015). Volúmenes de sólidos. Recuperado de <https://www.solomatemáticas.com/geometria/volumenes.htm>

LaGeo. (s.f.). Central Ahuachapán. Recuperado de <http://lageo.com.sv/CentralAhuachapan.html>.

LaGeo. (s.f.). Central Berlín. Recuperado de <http://lageo.com.sv/CentralBerlin.html>.

Lawrence Berkeley National Laboratory. (s.f.). TOUGH. Recuperado de <https://tough.lbl.gov>

Virtalis. (s.f.). GEOVisionary. Recuperado de <https://www.virtalis.com/software/geovisionary>

Seequent. (s.f.). Leapfrog Energy. Recuperado de <https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-energy/>

Schlumberger. (s.f.). Petrel Subsurface Software. Recuperado de <https://www.slb.com/products-and-services/delivering-digital-at-scale/software/petrel-subsurface-software/petrel>

Schlumberger. (s.f.). ECLIPSE Industry Reference Reservoir Simulator. Recuperado de <https://www.slb.com/products-and-services/delivering-digital-at-scale/software/eclipse-industry-reference-reservoir-simulator/eclipse>

PVsystem. (s.f.). PVsystem. Recuperado de <https://www.pvsystem.com>

ThermoFlow, Inc. (s.f.). ThermoFlow. Recuperado de <http://www.thermoflow.com>

Lawrence Berkeley National Laboratory. (s.f.). GeoT Limited 2.1. Recuperado de [https://marketplace.lbl.gov/geoenvironment/water-and-the-environment/geot\\_limited\\_2-1](https://marketplace.lbl.gov/geoenvironment/water-and-the-environment/geot_limited_2-1)

GeoScience Software Development Services Ltd. (s.f.). WellSim. Recuperado de <https://www.gsds.co.nz/wellsim/>

Axelsson, G., & Stefánsson, V. (2015). Numerical modeling of geothermal systems at Hengill, SW-Iceland. World Geothermal Congress 2015. Recuperado de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/22021.pdf>

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Ingeniería Mecánica. (2023). Material teórico del curso Ingeniería Mecánica Aplicada a la Geotermia AMG115. San Salvador, El Salvador: Universidad de El Salvador.

## Anexos

### Json de selección nacional

```

export const seleccion_nacional_data = [
  {
    "nombre" : "TablaNConv1",
    "Etapas" : 5,
    "Tipo" : "Convencional",
    "DProduccion" : 13.375,
    "DProduccionText" : "13 3/8",
    "diamText" : " Estructural = 36\n Superficial = 24 1/2\n Intermedio = 18
5/8\n Producción= 13 3/8\n Liner = 9 5/8",
    "Estructural" : 36,
    "Superficial" : 24.5,
    "Intermedio" : 18.375,
    "Produccion" : 13.375,
    "Liner" : 9.625,
    "diamAguText" : " Estructural = 40\n Superficial = 32\n Intermedio = 23\n
Producción= 17 1/2\n Liner = 12 1/4",
    "EstructuralAgu" : 40,
    "SuperficialAgu" : 32,
    "IntermedioAgu" : 23,
  }
]

```

```
"ProduccionAgu" : 17.5,  
"LinerAgu" : 12.25  
},  
{  
"nombre": "TablaNConv2",  
"Etapas": 5,  
"Tipo": "Convencional",  
"DProduccion": 9.625,  
"DProduccionText": "9 5/8",  
"diamText": " Estructural = 36\n Superficial = 20\n Intermedio = 13 3/8\n Producción = 9 5/8\n Liner = 7 5/8",  
"Estructural": 36,  
"Superficial": 20,  
"Intermedio": 13.375,  
"Produccion": 9.625,  
"Liner": 7,  
"diamAguText": " Estructural = 40\n Superficial = 26\n Intermedio = 17  
1/2\n Producción = 12 1/4\n Liner = 8 1/2",  
"EstructuralAgu": 40,  
"SuperficialAgu": 26,
```

```
"IntermedioAgu": 17.5,  
"ProduccionAgu": 12.25,  
"LinerAgu": 8.5  
},  
{  
"nombre": "TablaNConv3",  
"Etapas": 4,  
"Tipo": "Convencional",  
"DProduccion": 13.375,  
"DProduccionText": "13 3/8",  
"diamText": " Estructural = 36\n Superficial = 24 1/2\n Producción = 13  
3/8\n Liner = 9 5/8",  
"Estructural": 36,  
"Superficial": 24.5,  
"Produccion": 13.375,  
"Liner": 9.625,  
"diamAguText": " Estructural = 40\n Superficial = 32\n Producción = 17  
1/2\n Liner = 12 1/4",  
"EstructuralAgu": 40,  
"SuperficialAgu": 32,
```

```

"ProduccionAgu": 17.5,

"LinerAgu": 12.25

},

{

"nombre": "TablaNConv4",

"Etapas": 4,

"Tipo": "Convencional",

"DProduccion": 9.625,

"DProduccionText": "9 5/8",

"diamText": " Estructural = 36\n Superficial = 20\n Producción = 9 5/8\n
Liner = 7 5/8",

"Estructural": 36,

"Superficial": 20,

"Produccion": 9.625,

"Liner": 7,

"diamAguText": " Estructural = 40\n Superficial = 26\n Producción = 12
1/4\n Liner = 8 1/2",

"EstructuralAgu": 40,

"SuperficialAgu": 26,

"ProduccionAgu": 12.25,

```

```

"LinerAgu": 8.5
},
{
  "nombre": "TablaNExp1",
  "Etapas": 4,
  "Tipo": "Exploratorio",
  "DProduccion": 12.9375,
  "DProduccionText": "12 15/16",
  "diamText": " Estructural = 14 3/4\n Superficial = 13 1/4\n Producción =
12 15/16\n Liner = 3 3/4",
  "Estructural": 14.75,
  "Superficial": 13.25,
  "Produccion": 12.9375,
  "Liner": 3.75,
  "diamAguText": " Estructural = 15\n Superficial = 14 3/4\n Producción =
13 3/4\n Liner = 3 7/8",
  "EstructuralAgu": 15,
  "SuperficialAgu": 14.75,
  "ProduccionAgu": 13.75,
  "LinerAgu": 3.875

```

```

},
{
  "nombre": "TablaNExp2",
  "Etapas": 4,
  "Tipo": "Exploratorio",
  "DProduccion": 5.6875,
  "DProduccionText": "5 11/16",
  "diamText": " Estructural = 8 1/2\n Superficial = 6\n Producción = 5 11/16\n
Liner = 2 3/4",
  "Estructural": 8.5,
  "Superficial": 6,
  "Produccion": 5.6875,
  "Liner": 2.75,
  "diamAguText": " Estructural = 8 5/8\n Superficial = 6 1/4\n Producción =
6\n Liner = 3 7/8",
  "EstructuralAgu": 8.625,
  "SuperficialAgu": 6.25,
  "ProduccionAgu": 6,
  "LinerAgu": 3.875
},

```

```
{  
  "nombre": "TablaNExp3",  
  "Etapas": 3,  
  "Tipo": "Exploratorio",  
  "DProduccion": 12.9375,  
  "DProduccionText": "12 15/16",  
  "diamText": " Estructural = 14 3/4\n Producción = 12 15/16\n Liner = 3  
3/4",  
  "Estructural": 14.75,  
  "Produccion": 12.9375,  
  "Liner": 3.75,  
  "diamAguText": " Estructural = 15\n Producción = 13 3/4\n Liner = 3 7/8",  
  "EstructuralAgu": 15,  
  "ProduccionAgu": 13.75,  
  "LinerAgu": 3.875  
},  
  
{  
  "nombre": "TablaNExp4",  
  "Etapas": 3,  
  "Tipo": "Exploratorio",
```

"DProduccion": 5.6875,

"DProduccionText": "5 11/16",

"diamText": " Estructural = 8 1/2\n Producción = 5 11/16\n Liner = 2 3/4",

"Estructural": 8.5,

"Produccion": 5.6875,

"Liner": 2.75,

"diamAguText": " Estructural = 8 5/8\n Producción = 6\n Liner = 3 7/8",

"EstructuralAgu": 8.625,

"ProduccionAgu": 6,

"LinerAgu": 3.875

}

]

**Código Main**

