



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**METODOLOGÍA PARA EL MODELADO  
NUMÉRICO DE UN YACIMIENTO  
GEOTÉRMICO A PARTIR DE  
INFORMACIÓN DE REGISTROS DE POZOS  
PRESIÓN-TEMPERATURA**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Petrolero**

**P R E S E N T A**

Agustin Peña Baños

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Héctor Miguel Aviña Jiménez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

# ***Agradecimientos***

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi eterna casa, quien me permitió formarme como profesional y ser humano, por acobijarme desde la preparatoria y mostrarme el sentimiento y la responsabilidad social que conlleva ser uno más de sus hijos.

A ENAL por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, misma que me apoyó para formarme profesionalmente, especialmente al Dr. Gerardo Hiriart y al Ing. Roberto Rodriguez, quienes confiaron y apoyaron en el desarrollo mis capacidades como ingeniero.

Al director de este trabajo Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez, por su mentoría, paciencia y apoyo para la realización de este trabajo, a mis sinodales, Mtro. Iván Chavez, Ing. Gustavo Ortega, Ing. Agustin Velasco e Ing. Genero Muñoz, mismos que tuvieron la paciencia para revisar este trabajo a pesar de sus diversas actividades, por sus enseñanzas, pero principalmente por la confianza y amistad brindada a lo largo de mi estadía en las aulas de la facultad de ingeniería.

A mi familia, quienes son el pilar mas importante de mi vida, quienes me han apoyado en todas mis decisiones, así como la paciencia, cariño y amor brindado a lo largo de mis 24 años de vida, especialmente a mi padre, el Sr. Adrián Peña quien lo llevo siempre en mi corazón, a mi abuela Obdulia Silva que mas que mi abuela es mi madre y a mi hermano José Antonio Peña quien también es parte fundamental en mi vida, que gracias a su apoyo pude concluir esta etapa académica de mi vida.

A mis amigos, cómplices de vida que siempre estuvieron en los momentos de felicidad, alegría, estrés, rabietas, angustia y tristeza, Daniel Ortiz, Ricardo Cano, Daniel Bastida, Andrés Barranco, Fernanda García, Ithan Fernández, Carlos Hernández, Dax Jimenez, Álvaro Miranda, Luis Beltrán, Isabel Sánchez, Alejandro Dueñas, Rodolfo Morales y Andrés Pérez a ustedes que con cada palabra de aliento me motivaron a nunca rendirme y día con día ser mejor persona.

Agustin Peña Baños

Febrero de 2020

# Índice

Índice .....	3
Índice de tablas.....	5
Índice de figuras. ....	5
Nomenclatura.....	7
Resumen.....	9
Objetivos.....	10
Capítulo 1. Introducción.....	11
1.1. Estado del arte.....	13
1.2. Importancia del problema.....	13
1.3. Novedad del trabajo.....	13
1.4. Conclusiones del capítulo.....	14
Capítulo 2. Fundamentos.....	15
2.1. Generalidades de la ingeniería petrolera.....	16
2.1.1. Ingeniería de perforación.....	16
2.1.2. Ingeniería de yacimientos.....	17
2.1.3. Ingeniería de producción.....	18
2.2. Geotermia.....	19
2.2.1. Conceptos básicos de geotermia.....	20
2.2.2. Sistemas geotérmicos.....	21
2.2.3. Provincia geotérmica.....	22
2.2.4. Yacimiento geotérmico.....	23
2.2.5. Pozo geotérmico.....	26
2.2.6. Campos geotérmicos del mundo.....	27
2.2.7. Campos geotérmicos de México.....	32
2.3. Generalidades del modelado numérico de yacimientos.....	36
2.3.1. Ecuaciones fundamentales.....	37
2.3.2. Métodos de aproximación numérica.....	42
2.3.3. Concepto de condiciones iniciales.....	43
2.3.4. Concepto de condiciones de frontera.....	44
2.3.5. Conceptos de error y convergencia.....	45
2.3.6. Concepto de estabilidad numérica.....	46

2.4. Registros de pozo PT.....	46
2.4.1. Registro de temperatura .....	47
2.4.2. Registro de presión.....	47
2.4.3. Herramienta para la toma de registros de pozos P-T.....	47
2.5. Conclusiones del capítulo .....	48
Capítulo 3. Metodología.....	49
3.1. Planteamiento teórico.....	50
3.1.1.- Introducción a TOUGH2 (PetraSim). .....	50
3.1.2. Definición del modelo conceptual del yacimiento geotérmico.....	51
3.2. Modelado numérico. ....	51
3.2.1. Geometría del modelo computacional.....	51
3.2.2. Petrofísica de las rocas. ....	52
3.2.3. Conceptualización de condiciones de frontera. ....	52
3.2.4. Conceptualización de condiciones iniciales.....	53
3.2.5. Integración de la información de campo al modelo computacional.....	53
3.2.6. Calibración del modelo.....	54
3.3. Aplicación de la metodología a un yacimiento geotérmico del centro norte de México. ....	55
3.3.1.- Geología y sección del modelo.....	55
3.3.2.- Geometría del modelo computacional de acuerdo con el modelo conceptual.....	56
3.3.3.- Mallado del modelo. ....	58
3.3.4.- Integración de pozos al modelo. ....	59
3.4.5.- Condiciones iniciales y de frontera. ....	64
3.4.6.- Tiempo de simulación y pasos de tiempo. ....	67
3.4. Conclusiones del capítulo.....	67
Capítulo 4. Análisis de resultados.....	69
4.1.- Perfil de temperatura.....	70
4.2.- Puntos de observación.....	72
4.3.- Validación del modelo.....	73
4.4.- Conclusiones del capítulo.....	75
Conclusiones.....	76
Referencias.....	77

# Índice de tablas.

Tabla 1 Clasificación de la energía geotérmica (tomada de Tesis de licenciatura Andraca -Rodríguez 2012). ....	22
Tabla 2 Condiciones de frontera geométricas.....	66

# Índice de figuras.

Fig. 1 Ingeniería de yacimientos (tomada de Lonquist Field Service). ....	17
Fig. 2 Simulación numérica de yacimientos (tomada de Fundamentos de ingeniería de yacimientos, Oilproduction.net).....	18
Fig. 3 Instalaciones superficiales de pozos petroleros (tomada de Instalaciones Superficiales, CSIPP). ....	19
Fig. 4 Sistema integral de productividad de pozos (tomada de Instalaciones Superficiales, CSIPP).....	19
Fig. 5 Yacimiento geotérmico convencional (tomada de Ortega Jimenez G. tesis de licenciatura).....	24
Fig. 6 Esquema del cabezal de un pozo geotérmico (tomada de Andraca Gutiérrez F.H. y Rodriguez Marian J.R. tesis de licenciatura). ....	27
Fig. 7 Capacidad instalada de generación de energía geotérmica (Enero 2017). Fuente: Países con geotermia, generación de electricidad, Enero 2017 (ThinkGeoEnergy).....	28
Fig. 8 Complejo geotérmico, The Geysers (tomada de Aerial archives, 2007). ....	29
Fig. 9 Complejo geotérmico, Makban (tomada de Makban geothermal power plant fcecocamp.com). ....	29
Fig. 10 Complejo geotérmico, Darajat (tomada de tninkgeoenergy.com). ....	30
Fig. 11 Complejo geotérmico, Wairakei (tomada de tninkgeoenergy.com).....	30
Fig. 12 Complejo geotérmico, Lardarello (tomada de tninkgeoenergy.com). ....	31
Fig. 13 Complejo geotérmico, Cerro Prieto (tomada de Mexico to analyze impact of Cerro Prieto plant, bnamericas.com). ....	32
Fig. 14 Campo geotérmico Cerro Prieto, Baja California, México (tomada de Mexico to analyze impact of Cerro Prieto plant, bnamericas.com). ....	33
Fig. 15 Campo geotérmico Los Azufres, Michoacán, México (tomado de proyectofse.mx, 2016). ....	34
Fig. 16 Campo geotérmico Los Humeros, Puebla, México (tomada de Los Humeros volcán que produce energía, Milenio.com). ....	34
Fig. 17 Campo geotérmico Las Tres Vírgenes, Baja California, México (tomada de CFE anuncia licitación de una central geotérmica para Baja California Sur, bcsnoticias.mx).....	35
Fig. 18 Campo geotérmico Domo de San Pedro, Nayarit, México (tomada de piensageotermia.com). ....	36
Fig. 19 Volumen de control: elemento diferencial (tomada de Pérez Farrás, Ecuaciones de continuidad). ....	37
Fig. 20 Permeámetro de carga constante (tomada de Sánchez San Román F.J., Ley de Darcy). ....	39
Fig. 21 Volumen de control para un esquema de flujo de energía (tomado de Fenómenos de Transporte, Conducción de calor: Ley de Fourier). ....	40

<i>Fig. 22 Descripción grafica de las condiciones de frontera (tomado de Problema de condición de frontera, Wikipedia.com)</i> .....	44
<i>Fig. 23 Imagen de una sonda de medición de temperatura, presión y gasto modelo Kuster K10 para pozos geotérmicos</i> .....	48
<i>Fig. 24 Interfaz gráfica de PetraSim (tomada de thunderheadeng.com)</i> .....	51
<i>Fig. 25 Interfaz de PetraSim sobre la geometría del modelo (tomado de la interfaz gráfica del software PetraSim)</i> .....	52
<i>Fig. 26 Ubicación de provincias fisiográficas y área de estudio (tomada de Pérez Martínez A. tesis de licenciatura)</i> .....	55
<i>Fig. 27 Correlación del perfil 1 del modelo 2D y la sección geológica (tomada de Pérez Martínez A. tesis de licenciatura)</i> .....	56
<i>Fig. 28 Correlación del perfil 2 del modelo 2D y la sección geológica (tomada de Pérez Martínez A. tesis de licenciatura)</i> .....	56
<i>Fig. 29 Geometría del modelo computacional</i> .....	57
<i>Fig. 30 Arreglo litológico en el modelo computacional</i> .....	57
<i>Fig. 31 Arreglo del mallado del modelo de simulación</i> .....	58
<i>Fig. 32 Ubicación de pozos en el modelo</i> .....	60
<i>Fig. 33 Registro P-T del pozo A</i> .....	61
<i>Fig. 34 Registro P-T del pozo B</i> .....	61
<i>Fig. 35 Zonas de aporte, registro pozo A</i> .....	62
<i>Fig. 36 Zonas de aporte, registro pozo B</i> .....	63
<i>Fig. 37 Ubicación de los puntos de observación en el modelo de simulación</i> .....	64
<i>Fig. 38 Interfaz de PetraSim para entrada de datos petrofísicos</i> .....	65
<i>Fig. 39 Condición de frontera de superficie</i> .....	65
<i>Fig. 40 Condición de frontera de fondo</i> .....	65
<i>Fig. 41 Condiciones de frontera internas</i> .....	66
<i>Fig. 42 Simulación a 8.5 años</i> .....	70
<i>Fig. 43 Simulación a 62,000 años</i> .....	71
<i>Fig. 44 Simulación a 164,000 años</i> .....	71
<i>Fig. 45 Simulación a 200,000 años</i> .....	72
<i>Fig. 46 Perfil de temperatura, punto de observación pozo A</i> .....	73
<i>Fig. 47 Perfil de temperatura punto de observación pozo B</i> .....	73
<i>Fig. 48 Modelo térmico de la zona de estudio</i> .....	74
<i>Fig. 49 Comparativa de modelos térmico y de simulación</i> .....	74

# ***Nomenclatura.***

A: Área

A.C.: Antes de Cristo

CFE: Comisión Federal de Electricidad

Cp: Calor específico

dt: Diferencial en el tiempo

dx: Diferencial en la dirección x

dy: Diferencial en la dirección y

dz: Diferencial en la dirección z

D.C.: Después de Cristo

Est: Cambio de energía térmica almacenada

FDM: Finite difference method (método de diferencias finitas)

FEM: Finite element method (método de elementos finitos)

GWh: Giga watt hora

HDR: Hot Dry Rock (roca seca caliente)

IIE: Instituto de Investigaciones Eléctricas

IMP: Instituto Mexicano del Petróleo

J: Energía por unidad de área

JS: Energía que entra al volumen de control por unidad de tiempo

J'S: Energía que sale del volumen de control por unidad de tiempo

K: Conductividad térmica

k: Permeabilidad

Km: Kilometro

$km^2$ : Kilómetro cuadrado

KW: Kilo watt

m: metro

$m^2$ : metro cuadrado

me: Masa de entrada

ms: Masa de salida

MW: Mega watt

P: Presión

PEMEX: Petróleos Mexicanos

PEP: Pemex Exploración y Producción

PF: Provincia fisiográfica

PGPB: Pemex Gas y Petroquímica Básica

PPQ: Pemex Petroquímica

psi: Pounds-force per square inch (libra-fuerza por pulgada cuadrada)

PT: Presión – Temperatura

PXR: Pemex Refinación

Q: Caudal o gasto

q: Flujo

SENER: Secretaría de Energía

T: Temperatura

TOUGH: Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat (transporte de calor y agua subterránea insaturada)

TW: Tera watt

u: Vector correspondiente al eje x

v: Vector correspondiente al eje y

w: Vector correspondiente al eje z

W: Watt

$\alpha$ : Constante característica física

$\varphi$ : Campo del fenómeno de transporte

$\rho$ : Densidad

$\Delta h$ : Diferencia de potencial

$\Delta l$ : Distancia entre puntos de observación

$\Delta m_i$ : Variación de la masa en el interior del volumen de control

°C: Grados centígrados



# ***Resumen.***

En el presente trabajo se establece una metodología para el modelado numérico de yacimientos geotérmicos durante la fase exploratoria, utilizando la información obtenida de registros de pozos presión-temperatura.

Asimismo, se construye un modelo numérico de simulación de acuerdo con la metodología establecida, utilizando TOUGH2 (PetraSim), para ello se emplean los datos obtenidos en campo tales como el modelo conceptual, geológico y principalmente la información de registros presión-temperatura de pozos, con los cuales por medio de las curvas tanto de presión como temperatura se identifican zonas ladronas o de aporte las cuales serán cargadas al modelo de simulación, una vez realizada la corrida de simulación, esta es validada con el modelo térmico, el cual es resultado de la correlación de la información geológica y de registros presión-temperatura de pozos.

Con el modelo construido, siguiendo la metodología propuesta, así como asumiendo ciertos parámetros físicos y geológicos de las rocas, condiciones iniciales y de frontera, los resultados obtenidos para este trabajo son muy similares a los arrojados por el modelo térmico, por tanto, la corrida de simulación se considera muy buena, considerando que los modelos de simulación numérica son aproximaciones a las soluciones numéricas analíticas.

# ***Objetivos.***

Objetivo general: Establecer una metodología básica para el modelado numérico de yacimientos geotérmicos durante su fase exploratoria, utilizando principalmente la información obtenida mediante los registros de presión-temperatura resultantes de la etapa de exploración de un recurso geotérmico. Esta metodología permite la calibración del modelo numérico utilizando datos reales del yacimiento, además de llevar a un modelo computacional los parámetros geológicos, geofísicos, condiciones iniciales y de frontera del yacimiento a modelar.

Objetivo particular: Construir un modelo numérico de simulación de acuerdo con la metodología establecida.

Objetivo particular: Emplear los datos obtenidos en campo de un yacimiento geotérmico en fase exploratoria.

Objetivo particular: Utilizar como información principal la obtenida por medio de registros presión-temperatura de pozos de la zona de estudio.

Objetivo particular: Validar el modelo de simulación numérica, con el modelo térmico construido a partir de la información geológica y de registros de pozos presión-temperatura.

## ***Capítulo 1. Introducción.***

La ingeniería petrolera es la parte de la ingeniería que combina métodos científicos y prácticos orientados al desarrollo de técnicas para descubrir, explotar, desarrollar, transportar, procesar y tratar a los geo fluidos, principalmente hidrocarburos, aunque el ingeniero petrolero tiene la capacidad de participar en proyectos geotérmicos y acuíferos, ya que la ingeniería petrolera abarca conocimientos en ciencias de la tierra, física y química, siendo las ramas principales de la ingeniería petrolera; la ingeniera de yacimientos, ingeniería de perforación e ingeniería de producción, las cuales también son aplicables en la industria geotérmica.

Para este trabajo se abordarán las ecuaciones fundamentales de flujo, así como los métodos numéricos que resuelven dichas ecuaciones para poder modelar condiciones iniciales y de frontera, asimismo se considerará el comportamiento del flujo y temperatura a lo largo del tiempo de simulación para un sistema geotérmico.

El modelado numérico de un yacimientos, es una de las ramas de la ingeniería de yacimientos, que a su vez, es una herramienta útil, pero a la vez compleja para caracterizar y predecir el comportamiento de un yacimiento, en el caso de la geotermia, predecir de manera matemática el comportamiento del flujo, así como el abatimiento de la presión y temperatura, es una herramienta importante para la toma de decisiones en la vida útil del yacimiento, así como las intervenciones a futuro que a este se le puedan realizar. Siendo modelado numérico de yacimientos una de las ramas que el modelado numérico abarca, siendo el modelado numérico de yacimientos una herramienta que permite al ingeniero de yacimientos predecir el comportamiento del yacimiento, asimismo es una herramienta que, de acuerdo con los datos obtenidos de campo, permite modelar gastos óptimos de producción, reacciones químicas y efectos térmicos los cuales permiten evaluar el potencial del yacimiento, así como predecir la etapa de declinación de este.

Con un buen modelo de simulación, se puede obtener información valiosa para caracterizar el comportamiento del yacimiento, en cuanto al abatimiento de la presión y la temperatura, ya que, si este es administrado de manera integral, este prolongará su vida productiva y cumplirá con el objetivo de seguir brindando energía.

El analizar la información de entrada a un modelo numérico de simulación, así como de la integración de esta al modelo computacional, siendo la información más relevante la obtenida a través de registros P-T de pozos, hará obtener la mayor información posible del modelo numérico de simulación, que para este caso es un modelo utilizado en la fase exploratoria de un proyecto geotermoeléctrico, brindando un panorama general de las herramientas e información adicional que complementa al modelo numérico de simulación, que a su vez hará de la caracterización del yacimiento una actividad más compleja pero precisa para la administración y toma de decisiones del yacimiento.

Otra aplicación del modelado numérico de yacimientos es la de simular la evolución y conformación del yacimiento a lo largo de los miles de años para la formación de este y así poder calibrar los parámetros petrofísicos de la formación.

Para este caso, se construirá un modelo “estático” el cual simule las condiciones actuales, para que posteriormente dicho modelo funcione como base en posibles corridas de modelos dinámicos, es decir donde hay flujo a la superficie por medio de los pozos y así inferir el posible abatimiento de la presión y temperatura en el yacimiento. En este modelo se carga toda la información disponible de campo, asimismo se infieren condiciones en el modelo de acuerdo con las pruebas realizadas en cada corrida de simulación, siendo la información más relevante la obtenida en la toma de registros P-T.

### **1.1. Estado del arte.**

El modelado numérico de yacimientos geotérmicos es una de las ramas de la ingeniería de yacimientos, en México actualmente dicha rama se ha desarrollado con lentitud, sin embargo, esta es practicada por la CFE e instituciones educativas y de investigación.

A nivel mundial, países como Nueva Zelanda y Estados Unidos son los países que han sido precursores del modelado numérico de yacimientos, así como del desarrollo de tecnología para llevar a cabo dicha práctica.

En México, los modelos numéricos de simulación de los que se tiene conocimiento es de los campos geotérmicos Los Azufres, Cerro Prieto, Los Humeros y Las Tres Vírgenes, los cuales son administrados por la CFE, dichos modelos son característicos dado que, para su realización, el campo ya se encontraba en fase de desarrollo y por ende la información es abundante, asimismo el objetivo de los modelos de los que se tiene conocimiento, principalmente son realizados para conocer la distribución de la permeabilidad en el campo, temperatura, capacidad de aporte del yacimiento y escenarios de producción/inyección, con el que se puede estimar la generación de energía.

Actualmente los softwares comerciales utilizados para el modelado numérico de yacimientos geotérmicos son: Tetrad, Feflow, Fehm y Tough2, los cuales son considerados buenos simuladores, sin embargo, se espera que el desarrollo a futuro de dichos softwares radique en la formulación de ecuaciones de estado más exactas para sistemas H<sub>2</sub>O-NaCl-CO<sub>2</sub>, así como la mejora de la representación de la heterogeneidad del medio geológico.

### **1.2. Importancia del problema.**

Los modelos numéricos de simulación para gran mayoría de los sistemas naturales de flujo en el medio poroso (yacimientos petroleros, geotérmicos y acuíferos) son efectuados en la etapa de desarrollo o explotación, dado que en dicha etapa ya se cuenta con gran cantidad de datos, los cuales alimentan al modelo, así como un histórico con el cual el modelo es calibrado.

Elaborar un modelo de simulación numérica en la fase exploratoria con información de uno o dos pozos, así como información geológica y geofísica da como resultado un modelo de estado inicial con una posible distribución de temperatura, lo cual puede ser una herramienta útil para generar hipótesis que correlacionada con información geológica y geofísica pueden determinar posibles nuevas zonas de exploración o de perforación de nuevos pozos.

Cabe señalar que la información que se tiene en la fase exploratoria corresponde a registros de pozos P-T, columna litológica del pozo e identificación de estructuras capaces de almacenar a los fluidos, lo demás corresponde a la capacidad del ingeniero de yacimientos o modelador de considerar parámetros necesarios para alimentar el modelo.

### **1.3. Novedad del trabajo.**

El modelado numérico de yacimientos geotérmicos es una práctica común en la industria geotérmica, sin embargo, la finalidad de los modelos construidos es variada, si bien el modelado de las condiciones iniciales de un yacimiento geotérmico no es un trabajo nuevo, los casos documentados son realizados cuando el campo ya se encuentra en etapa de desarrollo, es decir, se cuenta con gran cantidad de información y la suposición de parámetros del yacimiento es menor respecto al ejercicio realizado en este trabajo.

En México, no se han documentado los resultados de corridas de simulación de estado inicial, sin embargo, no se descarta la práctica de estas, cabe recordar que los campos geotérmicos desarrollados iniciaron su fase exploratoria en los años 70 y los primeros modelos de simulación fueron aplicados al campo geotérmico de Cerro Prieto a finales de los 80, cabe mencionar que el retraso tecnológico sufrido en el desarrollo y adquisición de estas herramientas orilló a darle otro énfasis al uso de estas.

En este trabajo se propone una metodología para el modelado de yacimientos geotérmicos, durante la fase exploratoria, es decir que no se cuenta con mucha información, por lo cual gran parte de esta es inferida, siendo la información mas precisa, la obtenida por registros de pozos P-T.

#### ***1.4. Conclusiones del capítulo.***

Los modelos numéricos de simulación son herramientas que permiten caracterizar y predecir el comportamiento del yacimiento, sin embargo, el modelado numérico de yacimientos tiene diversas aplicaciones, para este caso se modela el estado inicial con lo cual se permite obtener el valor de parámetros petrofísicos del yacimiento durante la etapa exploratoria, en donde dicha información es escasa, asimismo, dicho ejercicio de simulación apoya al equipo de exploración a identificar nuevas zonas de interés que correlacionadas con los datos geológicos, geoquímicos y geofísicos puedan ser candidatas para la perforación de pozos lo cual permitiría el desarrollo del campo de optima manera.

## ***Capítulo 2. Fundamentos.***

## **2.1. Generalidades de la ingeniería petrolera.**

La ingeniería petrolera es una rama de la ingeniería la cual se encarga de la explotación de los recursos naturales, siendo el petróleo por excelencia, pero también de recursos tales como el vapor de agua (geotermia) y agua (acuíferos), para llevar a cabo dichas actividades, la ingeniería petrolera cuenta con ramas para la óptima explotación de los recursos naturales, siendo sus principales ramas la ingeniería de perforación, ingeniería de yacimientos e ingeniería de producción.

### **2.1.1. Ingeniería de perforación.**

La ingeniería de perforación es una de las ramas de ingeniería petrolera encargada de desarrollar, planificar, evaluar costos y supervisar las operaciones necesarias para la perforación de pozos, de petróleo, gas, agua y vapor. La ingeniería de perforación es encargada desde el diseño inicial del pozo, pruebas a pozos, terminación, reparación y abandono del pozo.

El personal de perforación puede ser empleados en tierra, plataformas marinas o unidades móviles de perforación ya sea por una compañía operadora, de servicios, o bien un contratista especializado en la perforación de pozos.

Un ingeniero de perforación es involucrado en temas de administración de contratos y servicios de perforación, así como en diseño y planificación de pozos, además de supervisar el equipo de perforación en sitio. El ingeniero de perforación trabaja con otros profesionistas tales como geólogos, geofísicos, geocientíficos, mecánicos y eléctricos, para supervisar el progreso de la perforación, supervisara la gestión de la seguridad y garantizar la protección del medio ambiente.

Parte del trabajo de un ingeniero de perforación se basa en:

- Preparar hojas de datos de pozos.
- Diseñar y/o seleccionar equipos de pozos.
- Elaborar programas de perforación, teniendo en cuenta los índices de producción deseados.
- Monitorear el progreso diario de las operaciones de pozos.
- Comparar los costos de perforación reales con los del programa de perforación y si es necesario recomendar cambios rentables.
- Contactar a contratistas y proveedores de servicios tales como compañías de cementación, pruebas a pozos, fluidos de perforación, así como equipo de perforación.
- Monitoreo de la seguridad ambiental y del mantenimiento del pozo.
- Apegarse a las normas de protección ambiental, en algunos casos a través del acercamiento a los gobiernos locales para garantizar el cumplimiento de los requisitos legislativos.
- Diseño de trayectorias direccionales de pozos (horizontales o multilaterales, según sea el caso).
- En caso de abandono o fracaso de la perforación, llevar el sitio de la perforación a su entorno ambiental inicial.

La exploración petrolera es una actividad internacional y el trabajo de un ingeniero de perforación puede llevarlo a todas partes del mundo, desde África hasta Europa del Este, el Medio Oriente o Sud América. El trabajo en plataformas costa afuera es físicamente exigente, a menudo en condiciones sucias, húmedas y ruidosas, aunque



el clima también puede ser desagradable, las condiciones de vida en la mayoría de los equipos son muy cómodas debido a que los aparejos suelen acomodar de 50 a 100 personas.

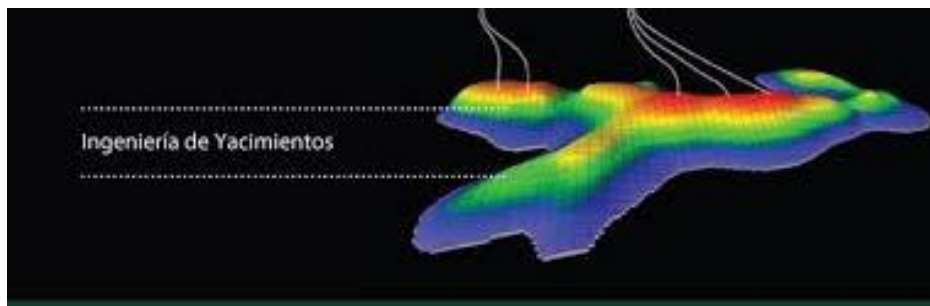
El ingeniero de perforación debe tener habilidades, tales como:

- Buena comprensión técnica de los principios científicos de las disciplinas como la geología, física, matemáticas y química.
- Alto nivel de aritmética y habilidades en tecnologías de la información.
- Capacidad analítica para solucionar problemas altamente complejos.
- Habilidades de trabajo en equipo.
- Sensibilidad a diferentes culturas y formas de trabajo.
- Capacidad de trabajar bajo presión.

### **2.1.2. Ingeniería de yacimientos.**

La ingeniería de yacimientos involucra la evaluación de yacimientos de petróleo, gas, agua y vapor. El ingeniero de yacimientos primero estima el tamaño del yacimiento y posteriormente determina la cantidad de reservas de petróleo, gas o agua, para el caso del vapor (geotermia) se estima el potencial del yacimiento, y finalmente, calculan como maximizar el rendimiento económico al extraer los recursos del subsuelo.

Generalmente no es posible determinar que hay debajo de la tierra, por lo cual el ingeniero de yacimientos necesita encontrar otras formas de establecer lo que hay allí, por lo tanto, trabaja en conjunto con geólogos y geofísicos para encontrar reservas de petróleo, agua, gas o alteraciones hidrotermales subsuperficiales, basándose en las leyes básicas de la física y química.



*Fig. 1 Ingeniería de yacimientos (tomada de Lonquist Field Service).*

El ingeniero de yacimientos hace un seguimiento del progreso de la producción de la reserva hasta su finalización. La ingeniería de yacimientos es el arte y ciencia que trata la predicción y control del funcionamiento o comportamiento de la producción de los fluidos de los yacimientos, esto con la aplicación de una fuente artificial de energía externa o sin ella. En las predicciones, el ingeniero de yacimientos pronostica el funcionamiento de la producción del campo y la recuperación que se espera en condiciones postuladas. Tales condiciones incluyen la anticipación de posibles tasas de producción.

El funcionamiento de un yacimiento se caracteriza por ciertos elementos esenciales dependiendo su tipo, por ejemplo: declinación de presión, declinación de temperatura, relación gas-liquido, relación agua-aceite, índice de productividad, gasto de producción, índices de desplazamiento, carga hidráulica, etc. Estos elementos se pueden expresar con función de la producción acumulativa, en forma fraccional, en base volumétrica, o como una

función de tiempo. Varios elementos obtenidos en la predicción del funcionamiento son de interés desde el punto de vista económico, de negocio y administración.

La responsabilidad final del ingeniero de yacimientos es maximizar la producción del yacimiento sin causar una sobreproducción, lo cual implica producir a tasas que acortan la vida útil del yacimiento, así como la implicación que conlleva de producir, transportar y procesar mayor cantidad de recurso.

La simulación numérica es una herramienta de la ingeniería de yacimientos, ya que a través de esta se puede predecir el comportamiento a futuro de la tasa de producción, abatimiento de presión, temperatura, carga hidráulica, niveles estáticos o dinámicos y con dicha información realizar intervenciones futuras al yacimiento para así alargar su vida útil e integral.

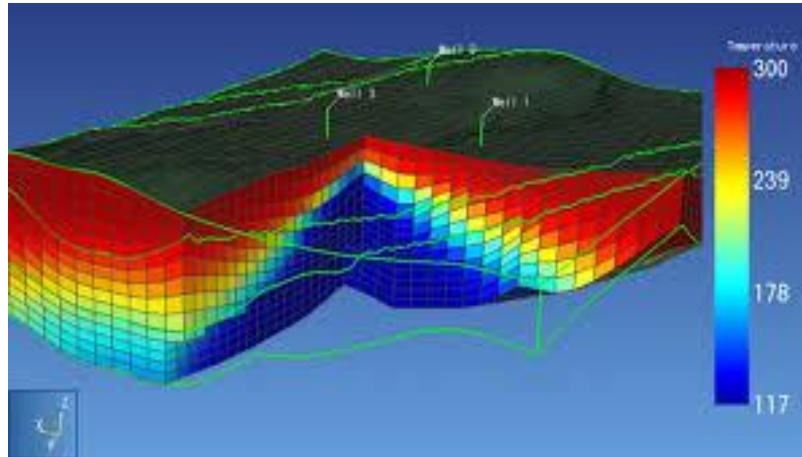


Fig. 2 Simulación numérica de yacimientos (tomada de Fundamentos de ingeniería de yacimientos, Oilproduction.net).

### **2.1.3. Ingeniería de producción.**

El trabajo de un ingeniero de producción consiste en diseñar y seleccionar el equipo para producir petróleo, agua, gas o vapor, una vez que el pozo ha sido perforado y terminado. Coordina la instalación, mantenimiento y operación de los equipos.

El ingeniero de producción supervisa el pozo para asegurar que el fluido fluye y este sigue siendo económicamente rentable, también recomiendan modificaciones para maximizar la eficiencia de la recuperación de los fluidos.

La producción de los fluidos involucra dos sistemas generales distintos, pero conectados entre sí, el yacimiento, que es un medio poroso con características únicas de almacenamiento y flujo y las estructuras artificiales, que incluyen al pozo, fondo de pozo y cabezal de pozo, así como las instalaciones de recolección, separación y almacenamiento de la superficie.

La Ingeniería de Producción que se encarga del control de la extracción de petróleo, agua gas o vapor, transportar, separar, y tratar los fluidos obtenidos del yacimiento a condiciones operativas seguras.



*Fig. 3 Instalaciones superficiales de pozos petroleros (tomada de Instalaciones Superficiales, CSIPP).*

La Ingeniería de Producción y Productividad de Pozos, abarca la aplicación de conocimientos y herramientas técnico-científicas para el transporte de los fluidos desde el yacimiento hasta los puntos de entrega. Asimismo, se encarga de definir los métodos de explotación de los yacimientos, además del diseño y optimización de los pozos y las instalaciones de superficie para el tratamiento primario de los fluidos, con el objetivo de trasportarlos a las condiciones requeridas para su distribución o comercialización. Sin olvidar los retos en la búsqueda de técnicas de explotación con procesos de recuperación secundaria y mejorada (para el caso de petróleo y gas) para que de la mano del ingeniero de yacimientos elevar los factores de recuperación de los yacimientos.

La Productividad de Pozos proporciona los conocimientos necesarios para optimizar la capacidad de producción de un sistema de producción de fluidos, con el propósito de contribuir a maximizar su rentabilidad y producción, así como también a incrementar la vida útil de los yacimientos, asimismo comprender los conceptos, técnicas y métodos relacionados con la optimización integral del sistema de producción de pozos de fluyentes, así como la evaluación de distintas alternativas de sistemas artificiales de producción que permita obtener el mayor cantidad de fluidos técnica y económicamente viables en superficie.



*Fig. 4 Sistema integral de productividad de pozos (tomada de Instalaciones Superficiales, CSIPP).*

## **2.2. Geotermia.**

En general, la palabra geotermia se refiere a la energía térmica natural existente en el interior de la tierra. En la práctica así se le denomina al estudio y utilización de la energía térmica que transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma, dando origen a los sistemas geotérmicos.

### **2.2.1. Conceptos básicos de geotermia.**

Para comprender a la geotermia es necesario conocer conceptos fundamentales que se presentan en los fenómenos producidos por dicha industria, asimismo a partir de la conceptualización y manifestación de dichos fenómenos se puede intuir y comprender el comportamiento de los sistemas geotérmicos, por ello es de vital importancia conocer los conceptos de geotermia, calor, temperatura y flujo de calor, los cuales son base fundamental de la conceptualización de la industria geotérmica.

#### ***Calor.***

El calor es una forma de energía que fluye de un cuerpo a otro de manera natural, fluye de un cuerpo con mayor temperatura hacia otro con menor temperatura, cualquier cuerpo posee energía interna o entalpía que a su vez permite el intercambio de calor con otros cuerpos y tanto el calor como la energía de acuerdo con el sistema internacional de unidades, se miden en Joules.

#### ***Temperatura.***

La temperatura es una variable que define el estado termodinámico de un cuerpo o porción de materia, este concepto es consecuencia de la ley cero de la termodinámica que estipula que, si un cuerpo A está en equilibrio térmico con un cuerpo B y a su vez un cuerpo C está en equilibrio térmico con el cuerpo B, entonces los cuerpos A y C están de la misma manera en equilibrio térmico. Se asume que equilibrio térmico es la condicional de no flujo de calor de manera natural entre ambos cuerpos. La temperatura es una propiedad intensiva de la materia, es decir no depende del tamaño del cuerpo o porción de la materia, mientras que la entalpía es una propiedad extensiva de la materia.

#### ***Flujo de calor.***

Con el crecimiento de la minería en los siglos XVI, XVII y XVIII, se tuvo la primera evidencia directa del incremento de la temperatura en la tierra conforme al aumento en la profundidad en cualquier punto de la tierra en la que se realice una excavación.

Los primeros intentos de explicar el régimen térmico del interior de la tierra fueron descritos por William Thomson Kelvin, en el siglo XIX. Kelvin supuso que la tierra a partir de cierta temperatura inicial se había ido enfriando paulatinamente al difundirse el calor del interior de la tierra a la atmosfera. Aunque sus conclusiones, actualmente se consideran erróneas, la aportación más importante de la suposición de Kelvin fue considerar que la condición térmica de la tierra ha sido variable, así como la relación que debe existir entre las leyes de la física y la geología.

Actualmente se sabe que el error fundamental de Kelvin fue el suponer que en el interior de la tierra no se genera calor, esto debido al decaimiento de los isotopos radioactivos de los elementos presentes en el manto, y en menor medida, en la corteza. Se ha estimado que el calor generado por este mecanismo es del orden de 27.5 TW.

Los estudios de gradiente de temperatura y flujo de calor son los más enfocados a explorar anomalías térmicas, sin embargo, para esto se requiere hacer perforaciones y por tanto el costo en una campaña de exploración geotérmica es mayor.

### **2.2.2. Sistemas geotérmicos.**

Un sistema geotérmico es aquel que da la constitución a un yacimiento que se encuentra en la naturaleza, en variedad de combinaciones, dada las características geológicas, físicas y químicas, dando origen a diferentes tipos de sistemas geotérmicos.

A continuación, se describe la clasificación propuesta por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

#### ***Sistemas hidrotermales.***

Este tipo de sistema hidrotermal está constituido por una fuente de calor, el fluido (agua en fase líquida o vapor) y la roca donde se almacena dicho fluido. El agua de los sistemas hidrotermales es originada en la superficie, de manera pluvial o polar, esta se infiltra lentamente en la corteza terrestre, a través de poros y/o fracturas, hasta una profundidad donde es almacenada y calentada por la roca, alcanzando en algunas ocasiones temperaturas de hasta 400°C.

Los sistemas hidrotermales pueden clasificarse en tres tipos principales:

- a) Vapor dominante: Son sistemas de alta entalpia, generalmente de vapor seco.
- b) Líquido dominante (alta entalpia): Sistemas de salmuera super caliente, con temperatura entre 200°C y más de 300°C aproximadamente.
- c) Líquido dominante (baja entalpia). Sistemas de salmuera caliente, con temperatura entre 100° y 200°C aproximadamente.

#### ***Sistemas roca seca caliente.***

Son sistemas rocosos con alto contenido energético, pero con poca o nula presencia de agua, son conocidos como HDR (Hot Dry Rock) por sus siglas en inglés, actualmente no son explotables comercialmente, aunque es probablemente uno de los recursos geotérmicos más abundantes. De acuerdo con el U.S. Geological Survey, se ha estimado que la energía almacenada en los yacimientos de roca seca caliente equivale a más de 500 veces la energía acumulada en todos los yacimientos de gas y petróleo del mundo, lo que habla de un recurso con un alto potencial.

#### ***Sistemas geopresurizados.***

Son sistemas que contienen agua y metano disuelto a alta presión (del orden de 10000 psi) y mediana temperatura (aproximadamente 150°C). Este tipo de sistemas geotérmicos ofrece tres tipos de energía: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (fluidos a muy alta presión).

#### ***Sistemas marinos.***

Son sistemas de alta entalpia existentes en el fondo del mar, actualmente no se explotan comercialmente, dado que hasta el momento dichos sistemas han sido poco estudiados. En la década de los años 90 se efectuaron estudios preliminares en el Golfo de California (Mercado, 1990, 1993), como parte de dichos estudios se incluyeron algunas inmersiones en submarino, lo que permitió observar a 2600 metros de profundidad, chimeneas naturales, descargando chorros de agua a 350°C. El flujo de calor medido en algunos puntos del Golfo de California es muy alto, de  $0.34 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  (Suarez, 2000) mientras que en promedio el flujo natural de calor alcanza valores de entre  $0.056$  y  $0.1 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .

### **Sistemas magmáticos.**

Son sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos a gran profundidad en zonas de debilidad cortical. Posiblemente el atractivo más importante de este tipo de recurso, sean las altísimas temperaturas disponibles (800°C aproximadamente).

### **Clasificación de la energía geotérmica.**

Los recursos geotérmicos, tal y como se encuentran en la naturaleza no pueden ser aprovechados por el hombre, para ello es conveniente utilizar tecnología que convierta a la energía de manera sustentable, por lo cual se estipula la siguiente tabla de acuerdo con el nivel térmico que contenga dicho recurso.

Energía Geotérmica	Temperatura	Uso
Alta temperatura	$T > 150 \text{ } ^\circ\text{C}$	Producción energía eléctrica.
Media temperatura	$90^\circ - 150 \text{ } ^\circ\text{C}$	Producción energía eléctrica mediante el uso de plantas de ciclo binario.
Baja temperatura	$25 - 90 \text{ } ^\circ\text{C}$	Uso directo de calor: calefacción de viviendas, procesos industriales, usos agrícolas.
Muy baja temperatura	$T < 25 \text{ } ^\circ\text{C}$	Agua caliente sanitaria y aire acondicionado con el empleo de bombas de calor.

*Tabla 1 Clasificación de la energía geotérmica (tomada de Tesis de licenciatura Andraca -Rodríguez 2012).*

### **2.2.3. Provincia geotérmica.**

Según Cataldi y Mainieri (1995) una provincia geotérmica es definida de acuerdo a sus condiciones geológicas, térmicas e hidrogeológicas. Esta definición se ha utilizado para proponer un "ranking geotérmico" de áreas para

la producción de energía geotérmica. La mayoría de las evaluaciones son en función de la temperatura y la profundidad, la definición de provincia geotérmica no incluye el concepto de "play geotérmico", pero este ayudaría a categorizar el concepto de provincia geotérmica, según el tipo de sistema que se espera sea presente en cada zona, la definición de play geotérmico se define de forma similar, de acuerdo a la fuente y tipo de transporte de calor en relación con el entorno geológico, Moeck y Beardsmore, (2014) proponen seis tipos de plays: tres convectivos y tres conductivos:

CV1 - tipo magmático dominado por convección;

CV2 - dominado por convección tipo plutónico;

CV3 - tipo de dominio extensional dominado por convección;

CD1 = tipo intracratónico dominado por la conducción;

CD2: tipo de cinturón orogénico dominada por la conducción;

CD3 - tipo sótano dominado por la conducción;

Además de esos tipos, se debe incluir una provincia geotérmica que no se considera en los plays geotérmicos propuestos por Moeck y Beardsmore (2014), que son los sistemas geotérmicos geopresurizados. Este tipo de sistemas se encuentran en México asociados con los campos de aceite costa afuera del golfo de México. La viabilidad de su explotación ha sido promovida por nuevas tecnologías innovadoras y en un futuro próximo, se espera pueda suceder ya que estos juegan un papel importante en la producción de energía geotérmica.

#### **2.2.4. Yacimiento geotérmico.**

Se denomina yacimiento geotérmico al área geográfica en concreto la cual cuenta con las condiciones geológicas y geotérmicas favorables para que se puedan explotar de manera económicamente técnica, los recursos geotérmicos del subsuelo.

Un yacimiento geotérmico puede ser clasificado conforme a distintos criterios, ya sea por el contexto geológico, el nivel de temperatura, el modo de explotación y el tipo de utilización.

Un yacimiento geotérmico está compuesto de: un **aporte de fluido** es la parte donde el agua meteórica es filtrada de forma natural al subsuelo para recargar un acuífero, **roca almacén** que es la roca porosa y permeable que permite el flujo del fluido filtrado, la permeabilidad puede deberse a la que tiene intrínseca la roca, o la ocasionada por fracturas, fallas o disolución química, **roca sello** es una roca con muy baja permeabilidad (impermeable) que permite el confinamiento del fluido, **fuentes de calor** la cual debe estar cercana al acuífero para que esta pueda calentar al fluido hasta temperaturas que sean favorables para la generación de un yacimiento geotérmico, **manifestaciones superficiales** que aunque no siempre se presentan en presencia de un yacimiento geotérmico es muy común que estas estén asociados a un yacimiento geotérmico, pueden presentarse como fumarolas, pozas calientes que emanan de las fallas que llegan a superficie, volcanes de lodo.

Para la conformación de un yacimiento geotérmico es necesario que dichos elementos se encuentren en concordancia de espacio, sin embargo, en tiempo, la ventana de generación es más amplia, hablando en tiempos geológicos, dado que la fuente de calor debe ser relativamente joven, alrededor de un millón de años, lo cual indica que primero pudo haber existido el acuífero para posteriormente generarse la fuente de calor y al estar en concordancia solo en espacio se crea un yacimiento geotérmico.

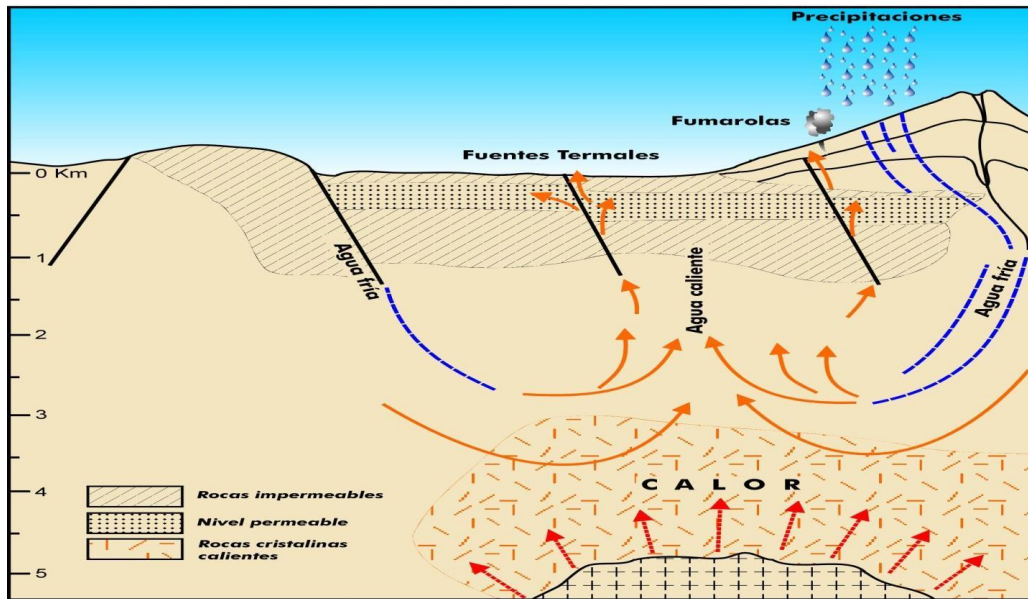


Fig. 5 Yacimiento geotérmico convencional (tomada de Ortega Jimenez G. tesis de licenciatura).

### ***Tipos de yacimientos geotérmicos de acuerdo al fluido dominante.***

Dentro de los sistemas hidrotermales existen diversas clasificaciones, para este trabajo se citará el presentado en el Manual de Geotermia (Quijano León J.L. 2007)

#### ***Yacimientos dominados por líquido.***

Cabe señalar que este tipo de yacimientos o sistema hidrotermal es de lo más comunes. Donde en su estado natural se caracteriza por el hecho de que la fase líquida es la predominante. Por lo general, las manifestaciones superficiales incluyen tanto fumarolas, en las zonas altas, así como manantiales hirvientes con alto contenido de cloruro de sodio en las zonas bajas, los fluidos que se producen en los pozos que conectan a estos yacimientos con la superficie son una mezcla de agua y vapor, aunque en la zona de aporte solo fluye líquido al pozo.

#### ***Yacimientos dominados por líquido con capa de vapor.***

Este tipo de yacimientos son similares a los dominados por líquido con la diferencia de que existe una capa de vapor en la parte superior del mismo, debido a la presencia de esta capa de vapor el cual es un fluido compresible, el yacimiento presenta un coeficiente de almacenamiento alto, debido a que, al producir los fluidos geotérmicos, la caída de presión es menor, debido al comportamiento presentado por el vapor, como un fluido compresible. Los pozos que sean terminados en una zona de aporte dominada por líquido presentara un comportamiento muy similar a los pozos que se encuentran en yacimientos dominados por líquido, pero si el pozo es terminado en una zona dominada por vapor, el pozo únicamente aportara vapor a la superficie.



### ***Yacimientos dominados por vapor.***

Las manifestaciones naturales de este tipo de yacimientos consisten en fumarolas o sueños vaporizantes, siendo nula la presencia de manantiales de agua caliente, como su nombre lo dice, la fase dominante en este tipo de yacimientos es el vapor, que representa más del 50% en volumen, aunque en masa el porcentaje es menor, debido a la baja densidad del vapor. El vapor se localiza en las zonas más permeables (fallas y fracturas de la formación), mientras que el líquido se encuentra en los poros de la matriz de la roca, el vapor al ser la fase móvil dentro del yacimiento es la que fluye hacia el pozo, mientras que la fase líquida se constituye como una reserva importante de masa que, al evaporarse por la transferencia de calor de la roca, contribuye a la producción de vapor.

### ***Yacimientos de baja permeabilidad.***

Este tipo de yacimientos son poco comunes dado que se caracterizan por estar saturados de líquido en condiciones naturales, por lo que el perfil de presión es del tipo hidrostático, asimismo este tipo de yacimientos se caracteriza por tener ausencia de manifestaciones termales del tipo fumarolas o manantiales, en todo caso se limitan a suelos vaporizantes. Este comportamiento se debe a la baja permeabilidad de la formación, por lo cual, al terminar el pozo, purgar y posteriormente abrir a producción, el gradiente de presión entre el pozo y la formación debe ser bastante grande para poder vencer la resistencia al flujo, conforme el fluido se mueve hacia el pozo, la presión pasa de una condición de líquido comprimido a una condición de saturación y se inicia el proceso de ebullición dentro del yacimiento. El calor latente de ebullición es proporcionado por la roca. Cuando el fluido ingresa al fondo del pozo, es vapor casi en su totalidad, se estima una calidad de vapor superior a 0.9.

### ***Tipos de yacimientos geotérmicos de acuerdo a la temperatura.***

Dentro de los sistemas hidrotermales existen diversas clasificaciones, para este trabajo se citará el presentado en el Manual de Geotermia (Quijano León J.L. 2007)

### ***Yacimientos de baja temperatura.***

Un yacimiento de baja temperatura se puede localizar dentro de una cuenca sedimentaria, en donde el gradiente geotérmico es normal o ligeramente superior, la temperatura de estos yacimientos oscila entre los 30 y 90 °C, la única condición geológica requerida es la existencia de un acuífero a una profundidad de entre 1500 y 2500 m dentro de una formación permeable capaz de contener y dejar circular los fluidos que extraen el calor de las rocas.

### ***Yacimientos de media temperatura.***

Un yacimiento de media temperatura se puede localizar al igual que los yacimientos de baja temperatura, en una cuenca sedimentaria a profundidades que oscilan entre los 2000 y 4000 m, asimismo se pueden localizar en zonas del planeta en donde se encuentre una elevada concentración de isótopos radioactivos, o en zonas de adelgazamiento litosférico, la temperatura de estos yacimientos oscila entre 90 y 150 °C.

### ***Yacimientos de alta temperatura.***

Un yacimiento de alta temperatura se puede localizar en zonas geográficas con gradiente geotérmico alto, de hasta 30 °C cada 100 m, es decir zonas donde coinciden la existencia de fenómenos geológicos tales como actividad sísmica elevada, formación de cordilleras en épocas geológicas recientes, actividad volcánica reciente y principalmente regiones volcánicas situadas en los bordes de las placas tectónicas, en este tipo de yacimientos se suele explorar a profundidades de entre 1500 y 3000 m, dado que a dicho intervalo de profundidad se esperan temperaturas de más de 150 °C.

### ***2.2.5. Pozo geotérmico.***

Al igual que los pozos petroleros o de agua, estos suelen tener un diseño de diámetro variable, dado que la perforación se va desarrollando por etapas, en las cuales el diámetro va de mayor a menor respecto a la profundidad. Por lo general se inicia perforando un agujero de 34 pulgadas de diámetro, hasta una profundidad de 100 m, sucesivamente se perfora a diámetros menores hasta llegar a los 2000 o 3000 metros de profundidad, generalmente los pozos se terminan colgando tubería de producción de 12 pulgadas.

Los pozos geotérmicos se clasifican en exploratorios, productores e inyectores, a continuación, se describe cada uno de estos;

La perforación de pozos exploratorios es una de las actividades exploratorias, el cual estará regida por resultados de las demás actividades de exploración, ya que a partir de estas se determinará el número de pozos exploratorios, ubicación y profundidad. El objetivo de realizar perforaciones exploratorias es corroborar, ampliar y si es necesario, modificar los conocimientos obtenidos con las demás actividades de exploración superficial.

La perforación de pozos productores contempla diversos objetivos, los cuales van a depender del tipo de recurso que se pretende obtener, estos van desde pozos de gradiente térmico bajo los cuales son poco profundos (300 - 1000 m) y diámetros pequeños, hasta recursos con un alto gradiente geotérmico los cuales tienen un gran diámetro y profundidad de hasta 3000 m.

Un pozo inyector se perfora con la finalidad de inyectar algún fluido al yacimiento, para el caso de la industria geotérmica, estos son con la finalidad de reinyectar los fluidos geotérmicos producidos, a una temperatura menor, regularmente entre 60 y 80°C. Un pozo inyector puede estar terminado con agujero descubierto o con tubería ranurada. La inyección de dichos fluidos puede ser de dos formas inyección por gravedad, es decir sin necesidad de bombear o instalando una bomba a boca de pozo.

Una vez que se tiene certeza de la existencia de recursos geotérmicos en una zona determinada, se perforan pozos que oscilan entre 1000 y 3000 metros de profundidad, según sea la necesidad, para el caso de los pozos exploratorios y productores es necesario realizar la instalación de un arreglo de válvulas, denominado árbol de válvulas cuya principal función es el manejo y control del pozo.

El árbol de válvulas se compone por el contrapozo, cabezal, carrete de expansión, válvula maestra, cruz bridada, un arreglo de válvulas que generalmente se compone por al menos dos válvulas laterales, y una válvula de operación.

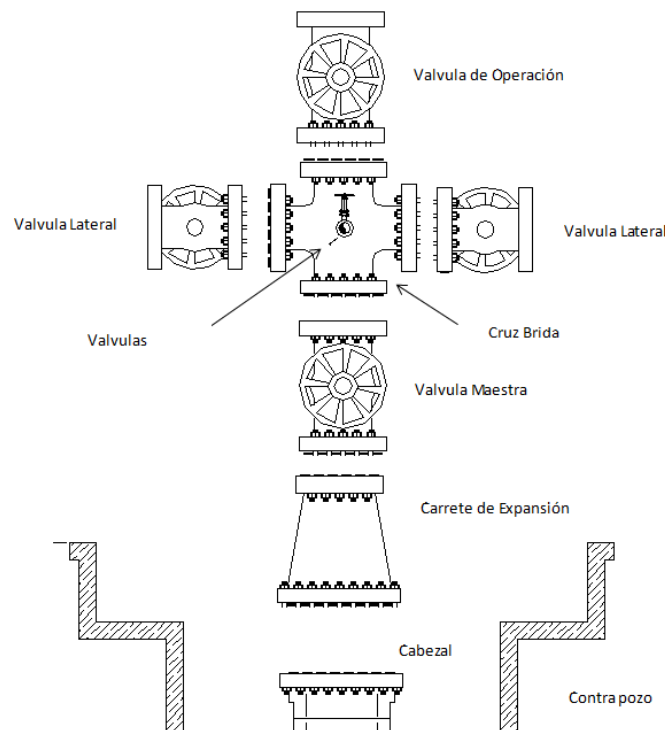


Fig. 6 Esquema del cabezal de un pozo geotérmico (tomada de Andraca Gutiérrez F.H. y Rodriguez Marian J.R. tesis de licenciatura).

### 2.2.6. Campos geotérmicos del mundo.

Los recursos geotérmicos no solamente se utilizan en la generación de energía eléctrica, sino también en actividades de usos directos de este recurso. Aunque la geotermia como fuente de energía no es tan conocida, ni se ha vuelto tan popular como otras fuentes de energía renovables, en el año de 2017 se tenía una capacidad instalada en el mundo de 13,270 MW, hoy en día esta energía se encuentra presente en 78 países, pero en 10 de estos se tiene un rango considerable para la generación de energía eléctrica, así como los usos directos, de los cuales indican en sus programas de ahorro de energía. Aun y con la inmensa cantidad de generación de energía obtenida de los recursos geotérmicos, su aprovechamiento ha sido limitado, debido a que la capacidad mundial instalada (13,270 MW) solo representa un pequeño porcentaje de las necesidades mundiales de energía.

Si bien, la tecnología desarrollada para la transformación y aprovechamiento de esta energía ha sido completamente asimilada, esta solamente se ha concentrado en la explotación de los sistemas convectivos hidrotermales de alta temperatura, los cuales se encuentran de forma limitada en el mundo.

Para calcular la energía anual generada por los sistemas geotérmicos se debe tener en cuenta el número de horas que se encuentra en funcionamiento, el factor de planta, el cual es la relación entre la generación real de una central eléctrica en un periodo de tiempo y la generación teórica que podría haber producido en ese mismo periodo de tiempo de acuerdo con su capacidad. Por tal motivo la geotermia es considerada como la única energía renovable que se encuentra disponible las 24 horas del día, dado que cuenta con un factor de planta entre el 80 y 90%.

Con respecto a la ocupación del terreno y el impacto visual de esta tecnología, es prácticamente nulo, respecto a otras tecnologías de generación eléctrica tales como la fotovoltaica y eólica donde se ocupan grandes extensiones de terreno y la contaminación visual es notable.

Hasta el 2017, 24 países producen electricidad con energía geotérmica, sumando una capacidad instalada de 13,270 MW. En la figura 7 se muestra la capacidad instalada en MW de cada uno de estos 24 países.

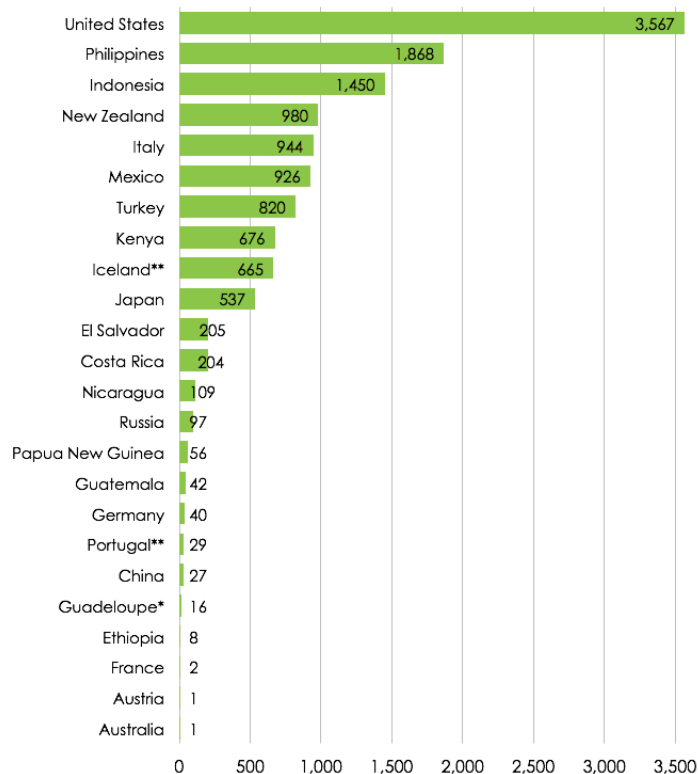


Fig. 7 Capacidad instalada de generación de energía geotérmica (Enero 2017). Fuente: Países con geotermia, generación de electricidad, Enero 2017 (ThinkGeoEnergy).

A continuación, se presentan las 6 primeras potencias en energía geotérmica de acuerdo con la figura 7.

### **Estados Unidos.**

Estados Unidos de América hasta el 2017 tiene una capacidad instalada de 3567 MW, lo cual lo hace el líder mundial de generación de electricidad a través de la energía geotérmica.

Su campo más importante es el complejo geotérmico The Geysers el cual se encuentra a 121 kilómetros al norte de San Francisco, California, se compone de 18 plantas de energía, la cual la convierten en la instalación geotérmica más grande del mundo. El complejo The Geysers cuenta con una capacidad instalada de 2923.5 MW y una capacidad de producción activa de 3093 MW. Las instalaciones en conjunto cubren un área de aproximadamente 78 Km<sup>2</sup>, las cuales iniciaron producción en el año de 1960 y este alcanzó su punto máximo en la década de 1980.



*Fig. 8 Complejo geotérmico, The Geysers (tomada de Aerial archives, 2007).*

### **Filipinas.**

Filipinas, hasta el 2017 cuenta con una capacidad instalada de 1868 MW lo cual lo hace el segundo país productor de electricidad a través de energía geotérmica.

Su campo más importante es el complejo geotérmico Makban el cual se encuentra en los municipios de Bahía y Calauan en la provincia de Laguna, así como el municipio de Santo Tomas en la provincia de Batangas. El complejo geotérmico Makban es propiedad de AP Renovables, el complejo cuenta con 6 plantas de energía que comprenden 10 unidades, incluyendo una planta binaria con 5 unidades de 3 MW y una unidad de 0.73 MW, siendo esta la segunda mayor instalación de energía geotérmica en el mundo, con una capacidad de generación de 46.78 MW. Dichas instalaciones se encuentran en una superficie de 700 hectáreas, Makban inicio operaciones en el año de 1979, siendo Mitsubishi Heavy industries uno de los principales proveedores de las turbinas utilizadas en el campo.



*Fig. 9 Complejo geotérmico, Makban (tomada de Makban geothermal power plant fceocamp.com).*

### **Indonesia.**

Indonesia, hasta el 2017 cuenta con una capacidad instalada de 1450 MW lo cual lo hace el tercer país productor de electricidad a través de energía geotérmica.

Su campo más importante es el complejo geotérmico Darajat el cual se encuentra ubicado en Garut, en el distrito de Pasirwangi en Java Occidental. El complejo geotérmico es gestionado por Darajat GPP Amoseas Indonesia, una subsidiaria de Chevron. Las instalaciones constan de 3 plantas lo cual la convierte en la décima mayor instalación geotérmica del mundo. Dichas instalaciones iniciaron operaciones en el año de 1994 con la primera planta, la segunda en el año 2000 y la tercera en el año de 2007.



*Fig. 10 Complejo geotérmico, Darajat (tomada de tninkgeoenergy.com).*

### **Nueva Zelanda.**

Nueza Zelanda, hasta el 2017 cuenta con una capacidad instalada de 980 MW lo cual lo hace el cuarto país productor de electricidad a través de energía geotérmica.

Su campo más importante es el complejo geotérmico Wairakei, el cual se encuentra localizado junto al río Waikato, a 10 km al norte de Taupo. El complejo geotérmico de Wairakei es administrado por Contact Energy, el complejo cuenta con 2 plantas de energía las cuales tienen una capacidad de generación de 67.2 MW y 90 MW respectivamente. Dichas instalaciones iniciaron operaciones en el año de 1958 quedando terminadas para el año de 1963.



*Fig. 11 Complejo geotérmico, Wairakei (tomada de tninkgeoenergy.com).*

### **Italia.**

Italia, hasta el 2017 cuenta con una capacidad instalada de 944 MW lo cual lo hace el quinto país productor de electricidad a través de energía geotérmica.

Su campo más importante es el complejo geotérmico Larderello el cual se encuentra situado en la Toscana, Italia. Enel Green Power es propietaria de las 34 plantas de energía del complejo geotérmico de Larderello, con una capacidad de generación de 810.5 MW. El complejo geotérmico comenzó operaciones hace más de un siglo, en 1913, siendo por tanto la primera planta de su tipo.



*Fig. 12 Complejo geotérmico, Lardarelo (tomada de tninkgeoenergy.com).*

### **México.**

México, hasta el 2017 cuenta con una capacidad instalada de 926 MW lo cual lo hace el sexto país productor de electricidad a través de energía geotérmica.

Su campo más importante es el complejo geotérmico Cerro Prieto, el cual se encuentra situado en el sur de Mexicali, en el estado de Baja California, al norte de México. El complejo geotérmico de Cerro Prieto al igual que los demás campos existentes en México son propiedad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el complejo cuenta con 4 plantas que constan de 13 unidades, siendo esta la tercera mayor instalación de energía geotérmica en el mundo, con una capacidad de generación de 67.21 MW. El complejo geotérmico Cerro Prieto comenzó operaciones con la instalación de su primera planta en el año de 1973, mientras que la cuarta fue puesta en marcha en el año 2012.



Fig. 13 Complejo geotérmico, Cerro Prieto (tomada de Mexico to analyze impact of Cerro Prieto plant, bnamericas.com).

### **2.2.7. Campos geotérmicos de México.**

Los recursos geotérmicos para la generación de electricidad en México se empezaron a aprovechar desde 1959, en el campo geotérmico Pathé, ubicado en el estado de Hidalgo, el cual, actualmente ya no opera, siendo esta la primera planta en el continente americano, por lo que, a nivel mundial, México es un buen referente en el tema de geotermia.

De acuerdo con las palabras de David Rocha, funcionario de SENER (Secretaria de Energía), en México se cuenta con experiencia, formación de recursos humanos y tecnología para el desarrollo y aprovechamiento de bienes geotérmicos que permiten generar energía eléctrica, pero donde se identifica que hace falta un mayor avance y aplicación es en los usos directos de la geotermia.

Actualmente se encuentran bajo explotación comercial cinco campos geotérmicos que generan 6.041 GWh lo que, como ya se mencionó, representa 1.84 % de la generación de energía eléctrica a nivel nacional. Cuatro de los campos están a cargo de la CFE (Comisión Federal de Electricidad) y la quinta siendo el Domo de San Pedro en el municipio de San Pedro Lagunillas, Nayarit, correspondiente a Grupo Dragon, el cual es un grupo del sector privado.

#### **Cerro Prieto.**

Se encuentra ubicado en el estado de Baja California (parte norte de México), cerca de la frontera con Estados Unidos, a 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali, Cerro Prieto es el segundo campo geotérmico más grande del mundo, después de The Geysers, en California, EUA, pero el más grande de líquido dominante, siendo su explotación, una de las más exitosas.

Cerro Prieto es un campo de tipo sedimentario, en el cual los fluidos geotérmicos se alojan en roas areniscas, siendo la fuente de calor una anomalía térmica formada por el adelgazamiento de la corteza terrestre.



Actualmente el campo geotérmico Cerro Prieto es el más grande y antiguo en operación a nivel nacional, este comenzó operaciones en el año de 1973, Cerro Prieto está dividido en cuatro zonas de explotación, cuenta con 443 pozos, de los cuales 152 son productores y 22 inyectores. Su capacidad instalada mediante nueve unidades es de 570 MW, las cuales se dividen en cuatro unidades de 37.5 MW cada una, una unidad de baja presión de 30 MW y cuatro unidades más de 25 MW cada una, todas las unidades son a condensación de un solo flasheo, excepto las de 37.5 MW las cuales son de doble flasheo, Cerro Prieto representa cerca del 40% de la demanda del sistema eléctrico de Baja California. Para el 2017 la producción de vapor fue de 31.032 millones de toneladas, siendo el rendimiento de vapor promedio por pozo de 26 toneladas por hora.



*Fig. 14 Campo geotérmico Cerro Prieto, Baja California, México (tomada de Mexico to analyze impact of Cerro Prieto plant, bnamericas.com).*

### **Los Azufres.**

Se encuentra ubicado en el estado de Michoacán (parte central de México), a 200 km de la Ciudad de México, ubicado en la denominada Faja Volcánica Mexicana, en la cual se encuentran volcanes actualmente activos como lo son el Popocatepetl y el volcán de fuego de Colima.

Los azufres es un campo de tipo volcánico cuyos fluidos geotérmicos están contenidos en rocas de tipo andesítico.

Actualmente el campo geotérmico Los Azufres es el segundo campo más grande a nivel nacional, los primeros estudios de prospección geotérmica de esta zona datan de 1975, un año después se construyen los primeros pozos exploratorios que confirmaron la existencia del yacimiento. Los Azufres cuenta con 48 pozos productores, 26 en la zona norte y 22 en la zona sur del campo y un total de 6 pozos inyectores, contando con 34 pozos adicionales de los cuales han sido catalogados como exploratorios, en estudio, en evaluación, etc. Los Azufres cuenta con 15 unidades de generación y una capacidad instalada de 247.9 MW, seis unidades a condensación de flasheo sencillo (una de 50 MW y cinco a 25 MW cada una), siete unidades a contrapresión de 5 MW cada una y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MW cada una, desde el inicio de su explotación se han extraído alrededor de 600 millones de toneladas de fluido, de las cuales el 68% corresponde a vapor y el 32% restante a salmuera.



*Fig. 15 Campo geotérmico Los Azufres, Michoacán, México (tomado de proyectofse.mx, 2016).*

### **Los Humeros.**

Los Humeros es el tercer campo geotérmico más importante de México, se ubica en la porción oriental de la faja volcánica transmexicana, en el estado de Puebla.

Es un campo volcánico, ubicado en el interior de una caldera volcánica cuyas últimas erupciones ocurrieron hace 20000 años, la roca que almacena a los fluidos geotérmicos son andesitas.

Los humeros comenzaron actividades en el año de 1978, pero fue hasta 1991 cuando se puso en marcha la primera unidad generadora de 5 MW y hasta Junio del 2017 entro en operación comercial la unidad 11 de 25 MW. El campo geotérmico Los Humeros cuenta con nueve unidades de generación, lo cual significa una capacidad instalada de 95.7 MW, en el año 2017, se extrajeron cerca de 16 millones de toneladas de fluido, del cual el 85% corresponde a vapor y el 15% restante a salmuera, actualmente cuenta con un total de 31 pozos, de los cuales 27 corresponden a pozos productores y 4 a pozos inyectores



*Fig. 16 Campo geotérmico Los Humeros, Puebla, México (tomada de Los Humeros volcán que produce energía, Milenio.com).*

### **Las Tres Vírgenes.**

La tres Vírgenes se ubica en la parte norte del estado de Baja California Sur, a 32 km del poblado de Santa Rosalía (parte media de la península de Baja California).

Se trata de un campo volcánico, del cual su fuente de calor se piensa es probablemente la cámara magmática del volcán La Virgen, las rocas que almacenan a los fluidos geotérmicos son de tipo intrusivo.

Los primeros estudios exploratorios se dieron en el año de 1983, pero fue hasta el 2001 en que se aprovecharon estos recursos geotérmicos para la generación de energía eléctrica. El campo geotérmico de las Tres Vírgenes cuenta con dos unidades a contrapresión de 5 MW cada una, lo cual significa una capacidad instalada de 10 MW, en el año 2017 se extrajeron cerca de 512 mil toneladas de vapor, actualmente cuenta con 5 pozos productores y 3 pozos inyectoros.



*Fig. 17 Campo geotérmico Las Tres Vírgenes, Baja California, México (tomada de CFE anuncia licitación de una central geotérmica para Baja California Sur, bcsnoticias.mx).*

### ***Domo de San Pedro.***

El domo de San Pedro se ubica en la parte sur del estado de Nayarit, en el poblado de San Pedro Lagunillas, siendo este el primer campo geotérmico desarrollado por la industria privada, siendo Grupo Dragón, el concesionario de dicho campo.

Se trata de un campo volcánico el cual tuvo una actividad intensa en el Plioceno y Cuaternario, siendo el domo un edificio volcánico de tipo ácido, el cual es el más importante de la zona, el cual tiene una altura de 700 m y un diámetro de aproximadamente 4 km, el domo el cual es de composición dacítica, se desarrolló dentro de una estructura de caldera de edad Plio-Cuaternaria.

Actualmente el Domo De San Pedro cuenta con una planta geotérmica de condensación con una potencia de 25.5 MW, la cual entro en operación desde 2016 ya que anteriormente contaba con dos unidades tipo backpressure de 5 MW cada una.



*Fig. 18 Campo geotérmico Domo de San Pedro, Nayarit, México (tomada de piensageotermia.com).*

### **2.3. Generalidades del modelado numérico de yacimientos.**

Un modelo numérico es una representación teórica de un fenómeno que existe dentro de la naturaleza, el cual se expresa de manera matemática para así tener una mejor comprensión del comportamiento del caso de estudio. Generalmente, el comportamiento de los fenómenos naturales está regido por ecuaciones, las cuales se expresan como ecuaciones diferenciales parciales, dichas ecuaciones describen la evolución en el paso del tiempo de las variables de las cuales depende la ecuación, asimismo los modelos matemáticos consisten en la combinación de dichas ecuaciones y valores de parámetros que se consideran constantes o son conocidos, así como de las condiciones de frontera del fenómeno que se desea modelar de manera numérica.

Generalmente las ecuaciones que describen dichos fenómenos naturales son ecuaciones complejas, es decir que es prácticamente imposible de resolver analíticamente, por tal motivo es necesario resolver dichas ecuaciones de forma aproximada usando métodos numéricos los cuales son resueltos por computadoras.

El modelado numérico de yacimientos es una de las actividades que se realizan dentro de la ingeniería de yacimientos la cual integra la diversa información de las diferentes disciplinas que participan en el desarrollo de un yacimiento geotérmico, tales como la geología, geoquímica petrofísica, geofísica, pruebas de presión y trazadores entre otras.

Para poder entender, desarrollar y obtener el modelo numérico del yacimiento es necesario tener las siguientes consideración e información; Modelo conceptual, ecuaciones matemáticas de los fenómenos a representar, información y suposiciones acerca de la distribución espacial de los parámetros hidrogeológicos, tales como porosidad y permeabilidad, asimismo caracterizar las propiedades del fluido y su comportamiento termodinámico es de vital importancia para hacer del modelo más cercano a la realidad, por tanto adicional a lo ya mencionado, el modelo requiere de datos del flujo másico, pozos, fuente de calor, así como de condiciones iniciales y de frontera.

### 2.3.1. Ecuaciones fundamentales.

Para comprender el comportamiento de un yacimiento geotérmico es necesario aplicar una serie de ecuaciones, las cuales de manera integrada y con ayuda de métodos numéricos ayudan a modelar de manera numérica al yacimiento, siendo las ecuaciones principales las de *continuidad*, *Darcy*, *estado*, *difusión* y *transferencia de calor*.

#### Ecuación de continuidad.

La ecuación de continuidad se obtiene del principio de la conservación de masa, aplicada al flujo de fluidos a través de un volumen de control. Considerando un volumen de control arbitrario, el balance entre la masa entrante y saliente a través de la superficie de este en un instante dado, más la variación de la masa en su interior y con variable tiempo tendiendo a cero, el resultado es igual a cero ya que la masa no puede crearse ni destruirse.

Matemáticamente, dicho fenómeno se expresa de la siguiente manera:

$$(m_s - m_e) + \Delta m_i = 0 \dots 1$$

Despejando el paréntesis que implica el balance de masa a través de la superficie lateral, la interpretación del principio de la masa puede interpretarse en forma más directa, puesto que el balance entre masa entrante y saliente por el volumen de control es compensado por la variación de la masa en el interior del volumen de control, por lo tanto, se reescribe:

$$(m_s - m_e) = -\Delta m_i \dots 2$$

Considerando que el volumen de control es un cubo de lados diferenciales  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  (figura 34), para las tres coordenadas, se desarrollan los términos dentro de los paréntesis, que implican el balance total de masa en un instante dado.

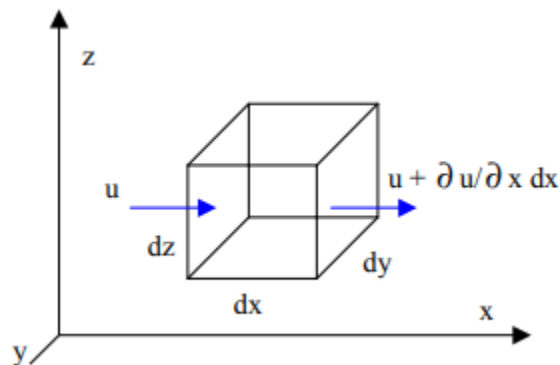


Fig. 19 Volumen de control: elemento diferencial (tomada de Pérez Farrás, Ecuaciones de continuidad).

La masa entrante de acuerdo con el eje  $x$ , resulta de multiplicar el gasto de masa en “ $x$ ” por el diferencial de tiempo ( $dt$ ), se expresa de la siguiente manera:

$$m_{ex} = dq_m = \rho dq = \rho u dx dy dt \dots 3$$

La masa saliente, resulta de:

$$m_{sx} = m_{ex} + \frac{\partial}{\partial x}(m_{ex})dx \dots 4$$

Es decir:

$$m_{sx} = \rho u \, dx \, dy \, dz \, dt + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \, dx \, dy \, dz \, dt) \, dx \dots 5$$

Por tanto, el balance entre masa entrante y saliente para el eje x resulta:

$$m_{sx} - m_{ex} = \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \, dy \, dz \, dt) \, dx \dots 6$$

Aplicando el mismo procedimiento a los ejes y, z, se tiene:

$$m_{sy} - m_{ey} = \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \, dx \, dz \, dt) \, dy \dots 7$$

$$m_{sz} - m_{ez} = \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \, dx \, dy \, dt) \, dz \dots 8$$

Por lo que, el balance total en un instante dado, es decir la diferencia ( $m_s - m_e$ ) será:

$$m_s - m_e = \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \, dy \, dz \, dt) \, dx + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \, dx \, dz \, dt) \, dy + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \, dx \, dy \, dt) \, dz \dots 9$$

Para evaluar la variación de la masa en el tiempo, se tiene que:

$$\Delta m_i = \left[ \rho \, dx \, dy \, dz + \frac{\partial}{\partial t}[\rho \, dx \, dy \, dz] \, dt \right] - \rho \, dx \, dy \, dz \dots 10$$

Por lo que:

$$\Delta m_i = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \, dx \, dy \, dz) \, dt \dots 11$$

Sumando e igualando a cero, con la finalidad de obtener la ecuación resultante del principio de conservación de masa, aplicada al volumen de control diferencial y eliminando los diferenciales comunes se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \dots 12$$

Escribiendo en notación vectorial y considerando a la densidad constante, se reescribe:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots 13$$

### ***Ecuación de Darcy.***

Henry Darcy, durante mucho tiempo trabajó en el abastecimiento de agua a la ciudad de Dijon en Francia, por ello nació su interés por el flujo de agua en medios porosos, ya que, para el abastecimiento de esta, se utilizaban filtros de arena para depurar, por ello, Darcy realizó una serie de experimentos con el cual creó el permeámetro de carga constante el cual consiste en un recipiente de sección constante por el que se hace circular agua, dicho dispositivo debe estar conectado en uno de sus extremos a un depósito elevado de nivel, mientras que en el otro extremo del dispositivo se regula el caudal de agua que pasa por la sección del dispositivo, tal como se muestra en la figura 20.

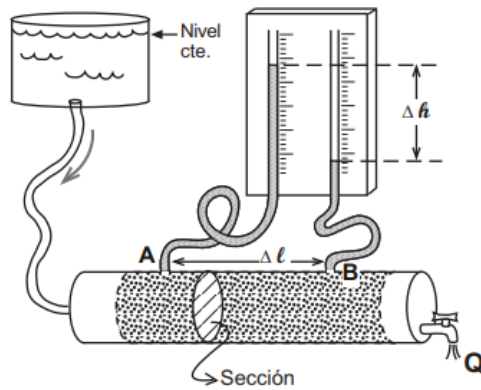


Figura 1.- Permeámetro de carga constante.

$Q$  = Caudal

$\Delta h$  = Diferencia de Potencial entre A y B

$\Delta l$  = Distancia entre A y B

Gradiente hidráulico =  $\frac{\Delta h}{\Delta l}$

Fig. 20 Permeámetro de carga constante (tomada de Sánchez San Román F.J., Ley de Darcy).

Darcy repitió múltiples veces dicho experimento, utilizando variedad en materiales porosos, determinando que el caudal que atravesaba la sección del dispositivo era linealmente proporcional a la sección y gradiente hidráulico, asimismo que la constante de proporcionalidad es característica de cada tipo de material con el que se llenaba el dispositivo.

Por tanto, Darcy determinó que, variando el caudal, los niveles del agua en los tubos variaban, esto sucedía con permeámetros de diferente diámetro y longitud, por lo cual, variando todas las variables y utilizando siempre el mismo material poroso se cumple que:

$$Q = K * sección * \frac{\Delta h}{\Delta l} \dots 14$$

Si se utiliza otro tipo de material poroso, ya sea más fino, más grueso o una mezcla de estas y variando todas las variables, se vuelva a cumplir la ecuación anterior, pero el valor de  $K$  (constante de proporcionalidad) es distinto de acuerdo con el tipo de material poroso, por tanto, Darcy concluyó que dicha constante era característica de cada material poroso y la llamó permeabilidad, aunque su denominación correcta actual es conductividad hidráulica.

Sabiendo que las unidades de  $Q$  son  $[L^3/T]$ , la sección del permeámetro  $[L^2]$ ,  $\Delta h$  y  $\Delta l$ , son longitudinales, se comprueba que las unidades de la conductividad hidráulica corresponden a velocidad  $[L/T]$ , por tanto, la expresión correcta de la ecuación de Darcy se escribe:

$$q = -K \left( \frac{dh}{dl} \right) \dots 15$$

donde:

$$q = \frac{Q}{sección \text{ (caudal que circula por } m^2 \text{ de sección)}}$$

$K$  = conductividad hidráulica

$\left( \frac{dh}{dl} \right)$  = gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales

El signo negativo se justifica, debido a que el nivel disminuye en el sentido del flujo, es decir  $dh$  es negativo y por tanto el signo negativo previo a la conductividad hidráulica hace que el flujo sea positivo.

## Ecuación de estado.

Una ecuación de estado es aquella que modela de manera matemática la relación entre dos o más propiedades termodinámicas, para el caso en que la ecuación es de un componente y monofásica, esta incluirá tres propiedades, de las cuales dos se consideraran como independientes, sin embargo, las expresiones analíticas que relacionan a dichas propiedades han sido limitadas a presión, volumen y temperatura, debido a la incomprensión de los fenómenos que ocurren en las interacciones intermoleculares, especialmente en fases líquidas y gaseosas y por tanto se han utilizado métodos empíricos para desarrollar ecuaciones de estado, debido a que la presión, temperatura y volumen son datos que pueden ser obtenidos experimentalmente.

## Ecuación de difusión.

Los fenómenos de transporte son aquellos procesos en los que hay una transferencia de materia, energía o momento lineal en cantidades macroscópicas. Estos fenómenos físicos tienen características comunes que pueden describirse mediante una ecuación diferencial de propagación unidimensional

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \dots 16$$

Donde  $\alpha$  es una constante característica de cada situación física y  $\varphi$  el campo correspondiente al fenómeno de transporte que trata.

A la ecuación que describe la difusión se le denomina Ley de Fick y para este caso  $\varphi$  es el campo que describe la concentración de soluto en el disolvente y la constante  $\alpha = D$ , siendo  $D$  el coeficiente de difusión. La difusión se establece siempre que exista un gradiente de concentración entre dos puntos del medio.

La ecuación que describe la conducción térmica se conoce como Ley de Fourier, en este caso el campo  $\varphi$  es la temperatura, y el coeficiente  $\alpha = \frac{K}{\rho c}$ , donde  $K$ , es la conductividad térmica,  $\rho$  es la densidad y  $c$  el calor específico del material.

De acuerdo con la ley de Fourier,  $J$  la energía por unidad de área y de tiempo, que se establece debido a la diferencia de temperaturas entre dos puntos del medio, la Ley de Fourier afirma que hay una proporcionalidad entre el flujo de energía  $J$  y el gradiente de temperatura.

$$J = -K \frac{\partial T}{\partial x} \dots 17$$

Siendo  $K$  una constante característica del material la cual se denomina conductividad térmica.

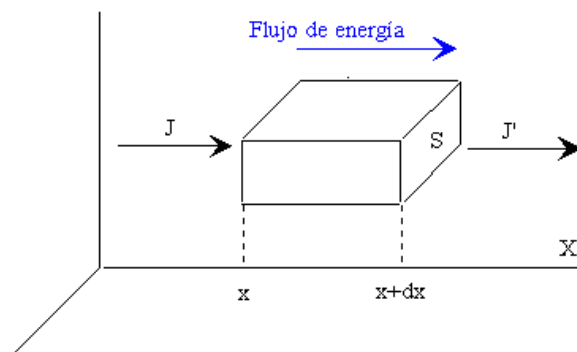


Fig. 21 Volumen de control para un esquema de flujo de energía (tomado de Fenómenos de Transporte, Conducción de calor: Ley de Fourier).



La energía que entra en el volumen de control por unidad de tiempo se le denomina JS, y la que sale J'S, por tanto, la energía del elemento cambia respecto al tiempo de manera proporcional a la diferencia entre el flujo entrante y saliente.

$$JS - J'S = -\frac{\partial J}{\partial x} S dx \dots 18$$

Dicha energía es la encargada en cambiar la temperatura del volumen de control ya que la cantidad de energía cedida o absorbida (por unidad de tiempo) por el volumen de control es igual al producto de la masa del volumen de control por el calor específico y por la variación de temperatura.

$$(\rho S dx) c \frac{\partial T}{\partial t} \dots 19$$

Igualando ambas expresiones y teniendo en cuenta la ley de Fourier, se obtiene la ecuación de difusión térmica.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots 20$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \dots 21$$

### **Ecuación de transferencia de calor.**

El calor transferido tiene dirección y magnitud, por ello la tasa de conducción de calor en dirección especificada es proporcional al gradiente de temperatura, el cual es el cambio de temperatura por unidad de longitud, ya sea en el sistema cartesiano, cilíndrico o esférico.

La conducción de calor en el medio ocurre en las tres dimensiones y depende del tiempo. Esto es la temperatura de un campo escalar de la forma,  $T = T(x, y, z, t)$  lo que significa que la temperatura en un medio varía con la posición y el tiempo. Por lo tanto, debido a la conducción de calor en un medio, si la temperatura no cambia con el tiempo, se le denomina estado estacionario, pero si la temperatura cambia con el tiempo se denomina estado transitorio.

El flujo de calor es una magnitud vectorial, por ello, la expresión matemática para el flujo de calor se puede escribir en notación vectorial (ecuación 22) y por tanto de acuerdo con la ley de Fourier y sustituyendo la (ecuación 23), el flujo de calor se reescribe de forma diferencial (ecuación 24)

$$\dot{Q}_n = \dot{Q}_x i + \dot{Q}_y j + \dot{Q}_z k \dots 22$$

$$\dot{Q}_n = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \dots 23$$

$$\dot{Q}_n = -kA_x \frac{\partial T}{\partial x} - kA_y \frac{\partial T}{\partial y} - kA_z \frac{\partial T}{\partial z} \dots 24$$

Las anteriores expresiones representan los flujos de calor a través de las paredes de un cuerpo o elemento diferencial colocado en el sistema cartesiano. Considerando un cuerpo homogéneo, en el sistema cartesiano y que la temperatura es un campo escalar, el flujo expresado en las caras de salida del elemento, puede expresarse según el teorema del valor medio como:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \dots 25$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \dots 26$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \dots 27$$

Las anteriores expresiones determinan la tasa de salida en las en las caras del elemento, el cual, también se puede denominar como volumen de control.

Asimismo, dentro del volumen de control se asume que pueden ocurrir cambios en su energía interna o energía térmica almacenada, considerando que tales cambios ocurren de manera en que los efectos del calor latente son despreciables dado que no existe cambio de fase, entonces dicho fenómeno puede expresarse de la siguiente manera:

$$E_{st} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \dots \quad 28$$

De acuerdo con la (ecuación 28) el triple producto de la densidad, calor específico y tasa de cambio de la temperatura en el tiempo, se le denomina tasa de cambio de energía térmica sensible del medio por unidad de volumen del sistema.

De acuerdo con la ecuación de la ley de conservación de la energía en su forma más simple, la energía que entra, menos la energía que sale, más la energía que se genera, menos la energía que se consume es igual a la energía que se acumula, por tanto, escribiendo de manera diferencial se obtiene:

$$q_x + q_y + q_z + \dot{q} dx dy dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \dots \quad 29$$

Sustituyendo y reordenando términos se obtiene:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \dots \quad 30$$

Finalmente se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \dots \quad 31$$

### **2.3.2. Métodos de aproximación numérica.**

Cuando se busca aplicar modelos matemáticos a situaciones reales que se presentan en la naturaleza, es común presentarse frente a problemas que no es posible resolver de manera analítica o exacta, por ello, para encontrar solución a tal problema, es necesario apoyarse de algún método numérico.

Un método numérico es un procedimiento del cual se obtiene una solución aproximada de algún problema que no cuenta con una solución exacta. Dicho procedimiento consiste en una serie de instrucciones secuenciales de operaciones algebraicas y lógicas (algoritmos), que producen una aproximación a la solución de un problema. La eficiencia en el cálculo de dicha aproximación depende de la sencillez del algoritmo implementado, así como de las características y limitantes de los instrumentos de cálculo (computadoras).

#### **Método de aproximación mediante diferencias finitas.**

El método de diferencias finitas o FDM (finite difference method) es un método para aproximar la solución de ecuaciones diferenciales parciales de acuerdo con el tipo de condición de frontera con la que la ecuación cuenta. El método consiste en que las derivadas sean remplazadas por aproximaciones en diferencias finitas, convirtiendo el problema de ecuaciones diferenciales en un problema algebraico  $Ax = b$ , el cual tiene solución por métodos matriciales.

Tomando en cuenta que los equipos de cómputo cada vez son más poderosos, la aplicación de métodos numéricos para resolver problemas de ciencia e ingeniería se ha convertido en algo normal en la comunidad científica.

El método de diferencias finitas tiene por objetivo aproximar la solución de las ecuaciones diferenciales, es decir, encontrar una función que satisfaga la relación de sus derivadas en alguna región del espacio o tiempo, con una serie de valores en su frontera. Generalmente resolver una ecuación diferencial parcial es complicado y raramente se obtiene una solución analítica, la cual satisfaga el problema a resolver. El FDM consiste en remplazar las derivadas de la ecuación por aproximaciones de diferencias finitas, obteniendo así un sistema de ecuaciones algebraicas, dicho sistema es más sencillo de resolver con ayuda de una computadora, la cual entrega una solución analítica del problema a resolver.

### ***Método de aproximación mediante elementos finitos.***

El método de elementos finitos o FEM (finite element method) ha adquirido relevancia dentro de los métodos de aproximación numérica debido a que, con este método la solución de problemas de ingeniería tales como análisis de fenómenos físicos de esfuerzos, deformaciones, distribuciones de temperatura, flujo de fluidos y vibraciones entre otros, se ha logrado reducir considerablemente los tiempos de diseño.

El método FEM como método numérico se ha desarrollado en los últimos tiempos y más aun con los avances tecnológicos, ya que han surgido distintos softwares comerciales que permiten analizar diversos fenómenos físicos que son incógnitas en problemas de ingeniería, mediante elementos finitos, con una mayor facilidad.

El método numérico de elementos finitos se emplea en la solución de ecuaciones en derivadas parciales para la solución aproximada de problemas continuos, definiendo condiciones iniciales y de frontera, las cuales se basan en la discretización del dominio del problema, los cuales son subdominios llamados elementos, los cuales están conectados por una serie de puntos llamados nodos.

Para discretizar el dominio del problema, existen diversos tipos de elementos, ya sea para un problema en dos dimensiones o bien en tres dimensiones. Para un caso bidimensional, los elementos pueden ser triángulos o polígonos y para un caso tridimensional, los elementos pueden ser cubos, tetraedros o hexaedros, asimismo de acuerdo a la precisión que se desea en el análisis, el cual va a depender de las dimensiones y geometría del dominio, se selecciona el tipo de elementos y la cantidad de estos, cabe mencionar que conforme incrementa la cantidad de elementos el método se vuelve más tardado y por lo tanto, computacionalmente hablando, costoso.

### ***2.3.3. Concepto de condiciones iniciales.***

Las condiciones iniciales son aquellos valores iniciales de los parámetros físicos de entrada para una simulación en estado estacionario. Las condiciones iniciales determinan un sesgo inicial que influye en el tiempo que lleva alcanzar la estabilidad, en los resultados y en las estimaciones calculadas.

Las condiciones iniciales se utilizan para definir el estado inicial de cada celda. Al ingresar los valores de condición inicial, generalmente los simuladores utilizan una jerarquía para determinar los valores de cada celda: si se define un valor en la celda, ese valor es usado; si se define en la región, se usa el valor de la región; si se define en la capa, se usa el valor de la capa; finalmente, se usarán las condiciones iniciales del modelo predeterminado.

Las condiciones iniciales específicas son diferentes para cada ecuación de estado. Para cualquier ecuación de estado específica, existen al menos condiciones iniciales simples y bifásicas, así como opciones para diferentes componentes.

Para modelos más simples las condiciones iniciales serán uniformes sobre el modelo. Es decir, se utilizará una simulación de estado estable para alcanzar una solución de equilibrio. Los resultados del estado estacionario se utilizarán como condiciones iniciales para el análisis transitorio.

### **2.3.4. Concepto de condiciones de frontera.**

Para solucionar una ecuación diferencial, esta depende de condiciones iniciales y de frontera. Las condiciones de frontera se refieren a los valores que toman los campos en las fronteras del dominio, es decir de las paredes o contornos de la caja del sistema en cuestión.

Las condiciones de frontera son valores que limitan a realizar cálculos numéricos en un dominio limitado ya que las fronteras a menudo conectan dominios de sistemas pequeños o particulares con sistemas generales o de gran escala.

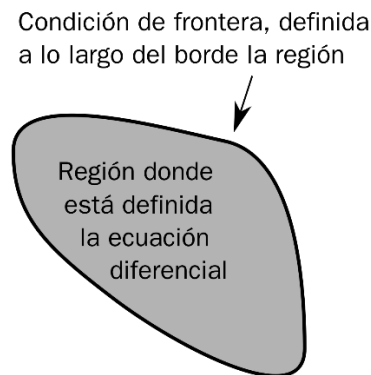


Fig. 22 Descripción grafica de las condiciones de frontera (tomado de Problema de condición de frontera, Wikipedia.com).

#### **Condiciones de frontera tipo Dirichlet.**

Las condiciones de frontera Dirichlet o de primer tipo, así denominadas en honor a Johann Peter Gustav Lejeune Dirichlet son empleadas cuando en una ecuación diferencial ordinaria o en derivadas parciales, se le especifican los valores de la solución que necesita la frontera del dominio, a la forma de hallar las soluciones a esas ecuaciones con dicha condición, se le conoce como problema de Dirichlet.

Es decir, para este tipo de condición de frontera, se especifica el valor de la función en todos los puntos de la frontera, si este valor es nulo, la condición es de Dirichlet homogénea.

#### **Condiciones de frontera tipo Neumann.**

Las condiciones de frontera Neumann o de segundo tipo, así denominadas en honor a Carl Neumann son empleadas cuando una ecuación diferencial ordinaria o en derivadas parciales, se le especifican los valores de la derivada de una solución tomada sobre la frontera del dominio.

Es decir, en todos los puntos de la frontera se especifica la derivada de la función y si esta es nula, se considera como homogénea.

### **Condiciones de frontera tipo Cauchy.**

Las condiciones de frontera Cauchy, así denominadas en honor a Augustin Louis Cauchy son empleadas en ecuaciones diferenciales ordinarias o en derivadas parciales cuando se imponen valores específicos a la solución de una ecuación diferencial que se toma de la frontera del dominio y de la derivada normal a la frontera, es decir, se imponen dos tipos de condiciones de frontera, las fronteras tipo Dirichlet y Neumann.

### **2.3.5. Conceptos de error y convergencia.**

El error y la convergencia en problemas de aproximación numérica aplicados a la ciencia e ingeniería son dos conceptos que forzosamente se deben considerar, ya que los tipos de errores pueden darse por la complejidad de la medición de la materia o bien por errores que las herramientas que solucionan los diversos métodos numéricos (calculadoras y computadoras) arrastran en los diversos procesos de cálculo que estas conllevan.

#### **Concepto de error**

Frecuentemente en problemas de ciencia e ingeniería es muy común trabajar con modelos matemáticos que son representativos de fenómenos físicos, estos modelos son abstracciones matemáticas que distan mucho de representar exactamente al fenómeno físico que se está estudiando. Como consecuencia de esto, existen diferencias entre los valores obtenidos experimentalmente y los calculados mediante un modelo matemático, a dichas diferencias se les conoce como errores.

Los errores, son múltiples y de diversa naturaleza, los cuales pueden clasificarse en dos grupos:

- Errores que provienen del modelo teórico-matemático, es decir del fenómeno real, los cuales se denominan **errores del modelo o inherentes**. Los errores inherentes son producto de factores intrínsecos a la naturaleza y ambiente, por tanto, son imposibles de remediar, aunque pueden minimizarse. Se distinguen dos tipos de errores inherentes: Las *incertidumbres* hacen referencia a las dimensiones físicas que nunca podrán ser medidas de forma exacta, debido a la naturaleza de la materia y a las imperfecciones de los instrumentos de medición. Las *verdaderas equivocaciones* son las situaciones que se producen en la lectura de instrumentos de medición o en el traslado de información.
- Errores que son producto de la limitante en la representación y manipulación de cantidades numéricas utilizadas en los cálculos necesarios en el desarrollo del modelo matemático, los cuales se denominan **errores del método**. Los errores del método son producto de los dispositivos de cálculo, tales como calculadoras y computadoras. Se distinguen dos tipos de errores del método: El *truncamiento* se provoca ante la imposibilidad de manipular, por parte de un equipo de cómputo, una cantidad infinita de términos o cifras, por tanto, las cifras omitidas introducen un error en los resultados calculados. El redondeo se produce por el mismo motivo que el truncamiento, pero a diferencia de este, las cifras omitidas son consideradas en la cifra resultante.

Los errores se cuantifican de maneras diferentes:

- Error absoluto: El error absoluto es la diferencia absoluta entre un valor real y un aproximado y este se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Error} = |\text{Valor real} - \text{Valor aproximado}| \dots 32$$

El error absoluto recibe este nombre ya que posee las mismas dimensiones que la variable bajo estudio.

- Error Relativo: Corresponde a la expresión en porcentaje de un error absoluto, en consecuencia, este error es adimensional y se calcula de la siguiente manera:

$$e = \frac{|\text{Valor real} - \text{Valor aproximado}|}{\text{Valor real}} \times 100\% \dots 33$$

### **Concepto de convergencia**

Matemáticamente, la convergencia es la propiedad de algunas sucesiones y series a tender progresivamente a un límite, es decir, que dicho límite existe, de forma análoga, si un método numérico en su funcionamiento iterativo nos proporciona aproximaciones cada vez más cercanas al valor buscado, se dice que el método converge. La convergencia se mide a través de los errores; si el error entre dos aproximaciones sucesivas se reduce, el método converge; se debe cumplir que:

$$|x_n - x_{n-1}| \leq |x_{n-1} - x_{n-2}| \dots 34$$

Es decir, la diferencia enésima ( $x_n - x_{n-1}$ ) debe ser menor que la diferencia  $(n - 1)$  ésima  $x_{n-1} - x_{n-2}$ .

### **2.3.6. Concepto de estabilidad numérica.**

Se dice que un sistema o proceso es estable si a pequeñas variaciones en la entrada o en el periodo de excitación corresponden pequeñas variaciones en la salida o respuesta. La estabilidad de un método numérico tiene que ver con la manera en que los errores numéricos se propagan a lo largo del algoritmo.

Cuando un método converge, lo deseable es que en los resultados se disminuya el error de la forma más rápida posible, sin embargo, ocurre que, durante la operación del algoritmo, ya sea por el manejo de los datos numéricos o bien por la naturaleza propia del modelo matemático con el que se esté trabajando, los errores entre aproximaciones no disminuyen en forma progresiva, sino que incluso aumenten en alguna etapa del proceso para después reducirse mostrando un comportamiento aleatorio.

La robustez de un método numérico radica en su convergencia y su estabilidad. Pueden utilizarse métodos cuya prueba de convergencia indique la eficiencia de este, pero que durante su aplicación se obtengan resultados inestables que repercutan en el número de iteraciones y en consecuencia en el tiempo invertido en la solución, por lo tanto, lo ideal es que los métodos numéricos empleados sean convergentes y a la vez estables.

## **2.4. Registros de pozo PT.**

Los registros de pozo presión-temperatura son los más importantes durante la fase exploratoria y de desarrollo de un campo geotérmico, debido a la variedad de aplicaciones que tienen en la industria geotérmica, la finalidad de correr un registro P-T es medir la presión y temperatura de la formación donde se alojan los fluidos geotérmicos.

La toma de registros puede realizarse durante la etapa de perforación (agujero descubierto) o cuando el pozo ya fue terminado y se encuentra ademado, cuando es tomado en la etapa de perforación, las mediciones de temperatura se ven perturbadas debido al lodo de perforación que se encuentra adherido a las paredes del pozo, asimismo cuando el agujero se encuentra descubierto o con ademe ranurado es posible identificar zonas de aporte o ladronas de fluido lo que a su vez cotejando con el registro de presión, proporcionan información sobre la productividad o inyectabilidad del pozo. Una de las aplicaciones más importantes de la toma de registros P-T es la realización de un mapa de isotermas o isobárico.

### ***2.4.1. Registro de temperatura***

Un registro de temperatura se corre con diversos fines, los cuales consisten en la localización de zonas de aporte, zonas ladronas, así como el perfil de temperatura del pozo, asimismo, con el monitoreo constante durante horas de la temperatura de fondo del pozo puede ser extrapolada y así determinar la temperatura real de la formación. Un pozo que se considera con daño generalmente es estimulado, una forma de determinar si la estimulación fue exitosa es comparando el registro de temperatura antes y después de la estimulación, siendo un pozo estimulado el que cuenta con mayor flujo y temperatura.

### ***2.4.2. Registro de presión***

Un registro de presión es fundamental en el estudio de los yacimientos geotérmicos, puesto que la presión es una propiedad que se mide directamente del fluido geotérmico. Las variaciones de presión que se puedan presentar en el yacimiento geotérmico son el principal mecanismo de empuje para que el fluido pueda ser producido.

Los objetivos de tomar un registro de presión son: estudiar las condiciones del pozo, elaborar mapas de las presiones del yacimiento, estudiar las variaciones de la presión durante la producción o inyección del fluido, asimismo, el monitoreo continuo de la presión en el yacimiento es de vital importancia para predecir el comportamiento del mismo.

### ***2.4.3. Herramienta para la toma de registros de pozos P-T***

Una amplia gama de herramientas se ha empleado para medir la presión y temperatura durante la perforación de pozos geotérmicos, a partir de la década de los años 80 se desarrollaron distintas herramientas electrónicas para operar a altas temperaturas, dichas herramientas miden presión, temperatura e incluso gasto (spinner). La primera versión de este tipo de herramientas consistía en una sonda con memoria integrada, la cual era bajada al pozo mediante un cable de acero para registrar y almacenar en su memoria interna la información, los dispositivos con los que contaba la sonda eran aislados con una carcasa a prueba de presión y un protector térmico para mitigar las condiciones de altas temperaturas dentro del pozo a las que los dispositivos eran expuestas.

Dichas herramientas son bajadas al pozo a una velocidad promedio de 30 m/min y la lectura de datos es cada metro, la precisión de la herramienta es muy confiable,  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  para temperatura y  $\pm 0.1$  bar para la presión.



Fig. 23 Imagen de una sonda de medición de temperatura, presión y gasto modelo Kuster K10 para pozos geotérmicos.

## **2.5. Conclusiones del capítulo**

La ingeniería petrolera y la geotermia, pareciera que son ramas diferentes, pero estas, más bien son complementarias dado que para la explotación de los recursos geotérmicos se necesita de las ramas auxiliares de la ingeniería petrolera, ya que para comunicar el yacimiento con la superficie es necesario perforar un pozo, asimismo para administrar la producción del yacimiento geotérmico, así como la salud de este, se requiere de los conocimientos de la ingeniería de producción y yacimientos, teniendo en cuenta que se deben contar con los conocimientos necesarios de ingeniería térmica para comprender el comportamiento del yacimiento geotérmico que si bien es asemejado a un yacimiento petrolero, ambos son totalmente diferentes y el comportamiento de cada uno tendrá diferentes manifestaciones.

Asimismo es necesario comprender que al igual que en la industria petrolera, en la geotermia la etapa de exploración es costosa y compleja, pero en México se cuentan con recursos geotérmicos y por tanto se tiene experiencia en la explotación de estos recursos, lo cual lleva a optimizar la vida útil de dichos yacimientos e invertir en nuevas zonas de exploración para brindar a las comunidades y al país una estabilidad y seguridad energética, siendo uno de los objetivos principales de la industria geotérmica, la generación de energía eléctrica.

Para realizar un modelo de simulación numérica, es necesario identificar los elementos que este lo componen, es decir, una serie de ecuaciones que en conjunto permiten modelar y caracterizar el comportamiento de un fenómeno físico, para este caso en particular, un yacimiento geotérmico, cabe mencionar que las ecuaciones que se mencionan en este trabajo (continuidad, Darcy, estado, difusión y transferencia de calor) se utilizan para modelar el flujo de calor convectivo en un medio poroso, sin embargo, existen softwares especializados que además de permitir modelar el flujo de calor convectivo, tienen la capacidad de modelar flujo de calor convectivo en medios fracturados, con presencia de gases o flujo de fluidos multifásicos, por lo cual al agregar ecuaciones que asemejen el comportamiento natural del yacimiento, hace al modelo más complejo y este a su vez requiere mayor capacidad computacional.



## ***Capítulo 3. Metodología.***

### **3.1. Planteamiento teórico.**

El modelado numérico de yacimientos es una de las herramientas con las que la ingeniería de yacimientos cuenta para caracterizar y predecir el comportamiento de yacimientos tanto petroleros, geotérmicos e incluso para la gestión de acuíferos.

Por medio de un buen modelo de simulación se puede obtener información valiosa para caracterizar al yacimiento, ya que, si este es administrado de manera óptima, este prolongará su vida productiva y cumplirá con el objetivo de seguir brindando energía, para el caso de un yacimiento geotérmico, caracterizar el comportamiento de este, en cuanto al abatimiento de la presión y la temperatura dará las herramientas para administrar de manera integral al yacimiento geotérmico, siendo el objetivo principal producir de manera sustentable energía.

El objetivo de este capítulo es analizar la información de entrada de un modelo numérico de simulación, así como la integración de esta a un modelo computacional, siendo la información más relevante la obtenida a través de registros de pozos, ya que al obtener la mayor información disponible de un modelo numérico utilizado en la fase exploratoria de un proyecto geotermoeléctrico, brinda un panorama general de las herramientas e información adicional que complementa a un modelo numérico de simulación, que a su vez hará de la caracterización del yacimiento una actividad más compleja pero precisa para la administración y toma de decisiones sobre el yacimiento.

#### **3.1.1.- Introducción a TOUGH2 (PetraSim).**

PetraSim es un preprocesador y postprocesador interactivo para la familia de códigos TOUGH, el cual ayuda a los usuarios a desarrollar rápidamente modelos y ver los resultados de dichas simulaciones de propósito general, que modelan flujos no isotérmicos de fluidos multicomponentes y multifásicos en medios porosos y fracturados.

PetraSim es un software especializado para la simulación de flujo de fluidos en el medio poroso, ya que es una herramienta con la cual se puede caracterizar el comportamiento de los fluidos geotérmicos, tiene la capacidad de simular flujo multifásico, asimismo es una herramienta que modela el flujo de calor, utilizando como base, datos geológicos, geofísicos, geoquímicos, geográficos y mecánicos, siendo un software con el cual se puede simular numéricamente el comportamiento de un yacimiento geotérmico.

Con PetraSim se puede realizar predicciones del comportamiento del yacimiento geotérmico así como una estimación del potencial del mismo, con la integración de la información obtenida en campo, desde petrofísica de las rocas, registros de pozos, así como datos geológicos y geofísicos que integran al modelo conceptual, con esta información además del predecir el comportamiento del yacimiento, se puede simular posibles escenarios de explotación e inyección del fluido geotérmico para la óptima administración del yacimiento, así como determinar la posible ubicación de nuevos pozos productores o inyectores.

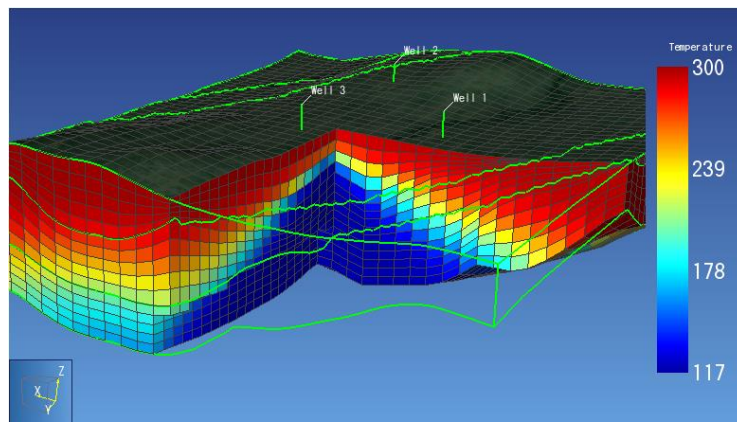


Fig. 24 Interfaz gráfica de PetraSim (tomada de thunderheadeng.com).

### **3.1.2. Definición del modelo conceptual del yacimiento geotérmico.**

El modelo conceptual es una simplificación esquemática de la naturaleza en la que se intenta representar las condiciones hidrogeológicas e hidrotermales reales de una cuenca y que hacen del modelo conceptual, un modelo más acorde a la realidad del sistema. El modelo conceptual se plantea a partir del análisis conjunto de la información geológica, hidrogeológica, hidrotérmica, geoquímica y geofísica, todos ellos son parámetros indicadores del comportamiento de flujo de fluidos, temperatura, así como de la hidráulica de pozos, fundamentales para que el modelo resultante sea congruente con lo que se encuentra en la naturaleza del sistema.

El modelo conceptual es por lo tanto un paso importante durante el desarrollo e implementación de esquemas de planeación y aprovechamiento óptimo de recursos geotérmicos.

## **3.2. Modelado numérico.**

### **3.2.1. Geometría del modelo computacional.**

Para realizar un modelo computacional, se debe indicar la geometría de dicho modelo, la cual generalmente, se le indica al software el dominio del modelo o en su caso por medio de comandos, dicho dominio del espacio se asigna de acuerdo al caso de estudio, si este es general o particular, cabe recordar que cuando el área de estudio es pequeña los objetivos del modelado son particulares ya que los datos que se tienen son de un área pequeña y por tanto es complicado tratar de modelar todo un sistema que generalmente de es decenas de kilómetros, generalmente los modelos computacionales son particulares, es decir se realizan con información obtenida de un área pequeña, con el objetivo de comprender el comportamiento solo de esa área, que a su vez y con mayores trabajos de exploración y recopilación de información de áreas aledañas se realizan modelos generales o regionales, en la cual se busca comprender el comportamiento de todo o gran parte del sistema a estudiar.

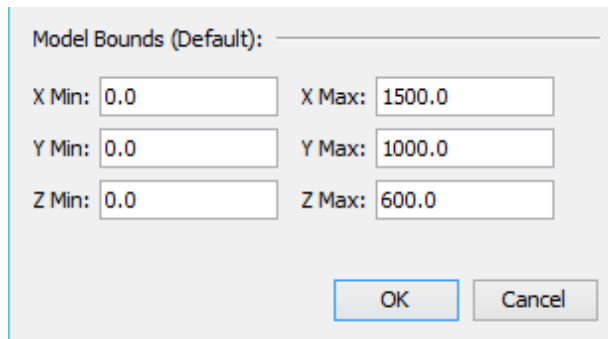


Fig. 25 Interfaz de PetraSim sobre la geometría del modelo (tomado de la interfaz gráfica del software PetraSim).

Se considera recomendable, comenzar con modelos pequeños de los cuales la información sea certera y abundante, aunque no necesariamente se debe tener mucha información del área de estudio para poder realizar un modelo. Asimismo, un modelo puede tener una forma irregular o bien formas regulares, que generalmente son prismas rectangulares o cubos, esto debido a la sencillez de la construcción de este y por tanto la discretización de esta geometría es mucho más sencilla.

### **3.2.2. Petrofísica de las rocas.**

La petrofísica es una especialidad que conjuga conocimientos de ingeniería petrolera, geofísica y geología, la cual determina las propiedades de la roca y los fluidos alojados dentro de la misma, asimismo la petrofísica determina la relación entre los fluidos y su movimiento a través del medio poroso.

Para el caso del modelado numérico de yacimientos geotérmicos, los datos petrofísicos que se ingresan al software generalmente son; densidad de la roca, densidad del fluido, porosidad de la roca, permeabilidad de la roca en tres direcciones, conductividad térmica, calor específico y en algunas ocasiones cuando se requiere mayor complejidad en el modelo, datos como permeabilidad relativa, presión de poro o presión capilar son algunos de los datos que son fundamentales como datos de entrada para el modelado del yacimiento debido a que estos aportan la información de las propiedades de la formación, asimismo estos datos dependiendo de la etapa del proyecto tienen cierto nivel de certidumbre, ya que cuando son modelos iniciales o de etapa exploratoria muchos de estos datos son hipotéticos o tomados de literatura, mientras que cuando el proyecto está en etapa de desarrollo los datos son más abundantes y por lo tanto tienen mayor certidumbre.

### **3.2.3. Conceptualización de condiciones de frontera.**

Como se menciona anteriormente, las condiciones de frontera son valores que toman los campos en las fronteras del dominio, es decir, valores de presión, temperatura, permeabilidad o tipo de fluido, es decir valores que rigen las propiedades de la roca o fluido.

Es necesario hacer énfasis en las dimensiones del modelo y la información con la que se cuenta, es decir, el nivel de complejidad que se tiene en el modelo conceptual, ya que de dicho modelo partirán las condiciones del modelo numérico del yacimiento, siendo que, de acuerdo con la litología del modelo conceptual, isotermas e isobaras que ahí se presenten, se definirán las condiciones de frontera del modelo. Aunque no necesariamente un modelo numérico de yacimientos debe ser de las mismas dimensiones del modelo conceptual, ya que generalmente se recomienda realizar modelos sencillos para a su vez con la adquisición de información y calibración de este, el modelo se vuelva más complejo en datos y dimensiones, por tal motivo al hacer al modelo

más pequeño las condiciones de frontera son bien identificadas ya sea por rasgos litológicos o petrofísicos, sin embargo cuando los datos no son muy abundantes se asumen o suponen condiciones de frontera, las cuales se consideran como los posibles escenarios de condiciones de frontera que tiene el yacimiento o la parte del yacimiento de la cual se pretende realizar el modelo.

### ***3.2.4. Conceptualización de condiciones iniciales.***

Las condiciones iniciales en un modelo numérico de yacimientos, son los valores que se otorgan a las propiedades petrofísicas, condiciones de flujo o incluso condiciones de tiempo, haciendo énfasis que estas no siempre serán las mismas, sino que cambiarán de acuerdo al tipo de problema o yacimiento que se quiera modelar, es decir, dichas condiciones iniciales serán integradas al modelo, dependiendo si este es estático o dinámico, asimismo las condiciones iniciales pueden ser supuestas en un modelo inicial, es decir, se toman valores típicos que son registrados en literatura de las propiedades petrofísicas de las rocas, de acuerdo a la litología del yacimiento, aunque para modelos de yacimientos en los que se quiere predecir el comportamiento de este, se integran como condiciones iniciales las que ya son propias del campo, es decir, hay muestras de litología, fluido, así como datos de presión y temperatura los cuales se integran como condiciones iniciales, cabe señalar que este tipo de modelos son empleados cuando el yacimiento ya se encuentra en etapa de desarrollo y por tanto este tipo de modelos son más complejos, si bien es cierto que un modelo predictivo, también se puede realizar en etapa exploratoria, este no es tan preciso, ya que no hay muchos datos de comparación o con los que el modelo se puede calibrar.

Para la metodología propuesta en este trabajo, se abordará un modelo inicial, en donde las condiciones iniciales estarán en función del flujo de calor, por lo cual en dicho problema se debe definir una fuente de calor y la temperatura a la que dicha fuente se asume se encuentra, ya que con información que brinda la ingeniería térmica y geotermómetros se puede estimar de manera indirecta dicha temperatura, asimismo las condiciones iniciales que alimentan al modelo son las que se asumen se encontraban en el tiempo cero, siendo las condiciones actuales las correspondientes al tiempo final.

### ***3.2.5. Integración de la información de campo al modelo computacional.***

Para crear un modelo computacional es necesario identificar un objetivo, es decir, saber cuál es la finalidad de crear un modelo de simulación numérica, para que, a partir de ello, se identifique la información necesaria con la que el modelo se debe nutrir.

Además de identificar el objetivo del modelo, es necesario saber la complejidad de este, dado que realizar un modelo de simulación numérica implica costos, desde la adquisición de softwares especializados, personal especializado en el manejo de dichos softwares y del entendimiento del sistema a modelar, así como de la toma de la información que va a nutrir al modelo.

Es necesario considerar que el obtener dicha información implica altos costos, ya que deben realizarse trabajos de exploración, generalmente levantamientos geológicos, campañas de exploración geofísica, perforación de pozos y toma de información de los pozos, siendo la integración de dicha información recabada en campo, la fuente que hace al modelo ser certero y funcional, el objetivo de este capítulo es tratar de hacer al modelo de simulación numérica lo más certero y funcional con la información disponible al momento.

Como se había mencionado anteriormente, se recomienda realizar modelos estáticos los cuales se calibren con las condiciones estáticas o “iniciales” es decir antes comenzar la explotación del campo, ya que tener un buen

modelo estático da mayor certeza en la información brindada cuando este se convierte en un modelo dinámico, por ello es indispensable integrar información básica que cualquier modelo de simulación numérica de yacimientos geotérmicos necesita.

La información necesaria que un modelo de simulación numérica necesita será determinada de acuerdo a las necesidades de dicho modelo, siendo necesario señalar que hay información que cualquier modelo necesita. El modelo conceptual muestra una hipótesis de la geometría y comportamiento de un sistema, para el caso de un yacimiento geotérmico, dicho modelo conceptual es construido mediante información de sistemas de información geográfica, geología y geofísica, dado que con la integración de estos, se demuestra la existencia de un yacimiento, asimismo es necesario conocer la hidrogeología de la zona, ya que esta aporta información de las zonas donde se ubican los fluidos geotérmicos y a su vez las propiedades físicas de las rocas que alojan a dichos fluidos. Para comprobar la existencia de dichos fluidos y las zonas donde se encuentran, si bien una manera de indirecta de determinar su posible ubicación y existencia es por medio de geofísica, la única forma de obtener dicha información es con la perforación de un pozo, siendo la construcción de un pozo, la obra que mayor información aporta para la caracterización del yacimiento geotérmico, ya que con la perforación de este se puede realizar la construcción de la columna litológica del sitio, se puede conocer las zonas permeables de la columna las cuales aportan fluidos o tienen la capacidad de recibir fluidos, asimismo con la corrida de registros PT se conoce el gradiente geotérmico y las presiones en el yacimiento.

Cuando se cuenta con toda esa amplia gama de información, se puede realizar un buen modelo de simulación numérica, siendo la antes mencionada, la información necesaria para realizar un modelo estático, el cual se puede configurar para predecir el comportamiento del yacimiento cuando este es abierto a producción, por lo tanto, el modelo se convierte en dinámico, cabe mencionar que para validar un modelo dinámico es necesario contar con un histórico de producción el cual se obtiene ya cuando el pozo es abierto por un periodo de tiempo relativamente largo.

### **3.2.6. Calibración del modelo.**

La calibración es el proceso de ajuste de valores de parámetros para optimizar el funcionamiento de parámetros de acuerdo a un grupo de criterios predefinidos.

Posterior o incluso previamente a la aplicación de los modelos matemáticos, en la gestión y administración de los yacimientos geotérmicos, estos deben ser ajustados a las condiciones terminas, petrofísicas, hidrogeológicas e incluso meteorológicas de la zona de estudio. Al proceso de adecuación donde los parámetros que rigen la naturaleza del yacimiento que en este caso es el sistema que se ve modificado en sus valores, se le conoce como calibración.

De acuerdo con la definición de Tomás Rodríguez Estrella, aplicada a modelos de simulación y caracterización de acuíferos, la calibración de modelos de simulación numérica, se utilizan para dar valores numéricos a aquellos parámetros sobre los que se disponen de pocos o nulos datos, siendo la etapa de calibración aquella que busca reproducir al modelo con mayor precisión el funcionamiento del sistema o en este caso el yacimiento geotérmico de estudio.

Una vez calibrado el modelo de simulación numérica, se procede a validar el mismo, el cual consiste en comparar los datos obtenidos por la calibración y los registrados a un tiempo dado, el cual debe corresponder al mismo tiempo de la simulación, ya que así se comprueba si el modelo es capaz de aportar información con un nivel adecuado de confiabilidad y precisión.

### **3.3. Aplicación de la metodología a un yacimiento geotérmico del centro norte de México.**

Una vez que ha sido analizada la información descrita en el capítulo 3.1 y 3.2, es necesario aplicar lo propuesto a un yacimiento geotérmico, cabe señalar que lo propuesto anteriormente es aplicable para la fase exploratoria, pero eso no inhibe que única y exclusivamente deba cumplirse, dado que los modelos de simulación numérica tienen variedad de aplicaciones, para este caso, la finalidad es crear un modelo “estático” el cual simule las condiciones actuales, para posteriormente tomar como base dicho modelo y hacer corridas de modelos dinámicos, es decir donde hay flujo a la superficie por medio de los pozos y así inferir el posible abatimiento de la presión y temperatura en el yacimiento.

En este modelo se carga toda la información disponible de campo, asimismo se infieren condiciones en el modelo de acuerdo con las pruebas realizadas en cada corrida de simulación, siendo la información más precisa la obtenida por medio de los registros P-T. Como se mencionó anteriormente, la información obtenida por estos registros es de gran valor cuando se encuentra en la fase exploratoria, sin embargo, correr registros P-T en la fase de desarrollo debe ser una práctica común, dado que mientras más información sobre el comportamiento del yacimiento permite al ingeniero de yacimientos integrar y comparar lo observado en campo con lo simulado, el cual es el mejor parámetro de calibración y validación de un modelo numérico de simulación.

#### **3.3.1.- Geología y sección del modelo.**

La zona de estudio es la correspondiente a la zona centro norte de México, en la cual se ubica la intersección de tres provincias fisiográficas de la república mexicana: La Mesa Central (PF1), Sierra Madre Oriental (PF2) y Faja Volcánica Transmexicana (PF3) (figura 26).

La porción sur de la PF1 contiene como rasgo principal la gran cantidad de rocas volcánicas de composición silícica, por otra parte, la PF2 está compuesta principalmente por rocas marinas de origen sedimentario, deformadas debido al acortamiento producido por la Orogenia Larámide el cual fue el fenómeno de la formación de las montañas del oeste de Norteamérica ocurrida durante el paleógeno, en el caso de la PF3 está compuesta de rocas volcánicas de composición variada y de edades entre el Mioceno medio y hasta el Holoceno.



*Fig. 26 Ubicación de provincias fisiográficas y área de estudio (tomada de Pérez Martínez A. tesis de licenciatura).*

De acuerdo a la geología local del área de estudio, afloran rocas que son distintivas de las provincias fisiográficas, rocas vulcano-sedimentarias marinas correspondientes a la PF2 del Cretácico y que presentan deformación

compresiva relacionada a la Orogenia Larámide, sobreyaciendo a esta unidad se encuentra el conglomerado relacionado a los inicios del régimen extensional del Oligoceno-Mioceno correspondientes a la PF4 y finalmente se emplazan aparatos volcánicos de composición máfica relacionados con la PF3 en el Plioceno-Pleistoceno. (Alaniz Álvarez, et al., 2001).

De acuerdo con la tesis de licenciatura elaborada por Andrés Pérez Martínez “Aplicación del método magnetotelúrico en la exploración de un sistema geotérmico” se presenta una comparativa entre la sección geológica de la zona de estudio, así como dos perfiles magnetotelúricos realizados en dicho trabajo de tesis (figuras 27 y 28).

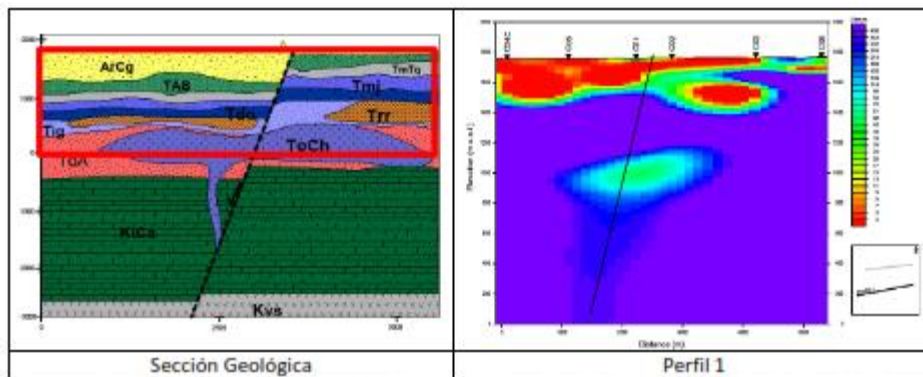


Fig. 27 Correlación del perfil 1 del modelo 2D y la sección geológica (tomada de Pérez Martínez A. tesis de licenciatura).

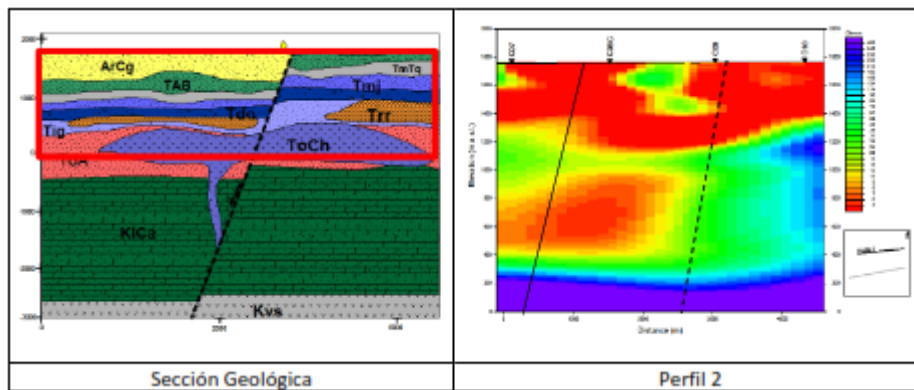


Fig. 28 Correlación del perfil 2 del modelo 2D y la sección geológica (tomada de Pérez Martínez A. tesis de licenciatura).

### 3.3.2.- Geometría del modelo computacional de acuerdo con el modelo conceptual.

De acuerdo con la información obtenida de la sección geológica y los perfiles magnetotelúricos realizados en la zona de estudio, así como la interpretación de los perfiles, los cuales indican bajas resistividades, son indicativo de la presencia de fluidos salinos a altas temperaturas, lo que asimismo indica la posibilidad de la existencia de un yacimiento geotérmico.

Una vez identificado el sistema hidrotermal es necesario construir el modelo computacional, es decir construir el bloque que albergará la información necesaria para llevar a cabo una corrida de simulación, asimismo en esta etapa de construcción del modelo se realizan suposiciones para la construcción del mismo, suposiciones que se detallaran en el tema de condiciones iniciales y de frontera, correspondientes a este capítulo.



Para este caso se realizará la construcción de un modelo computacional con la forma de un prisma rectangular de dimensiones X=2500 m, Y=2500 m, Z=5000 m

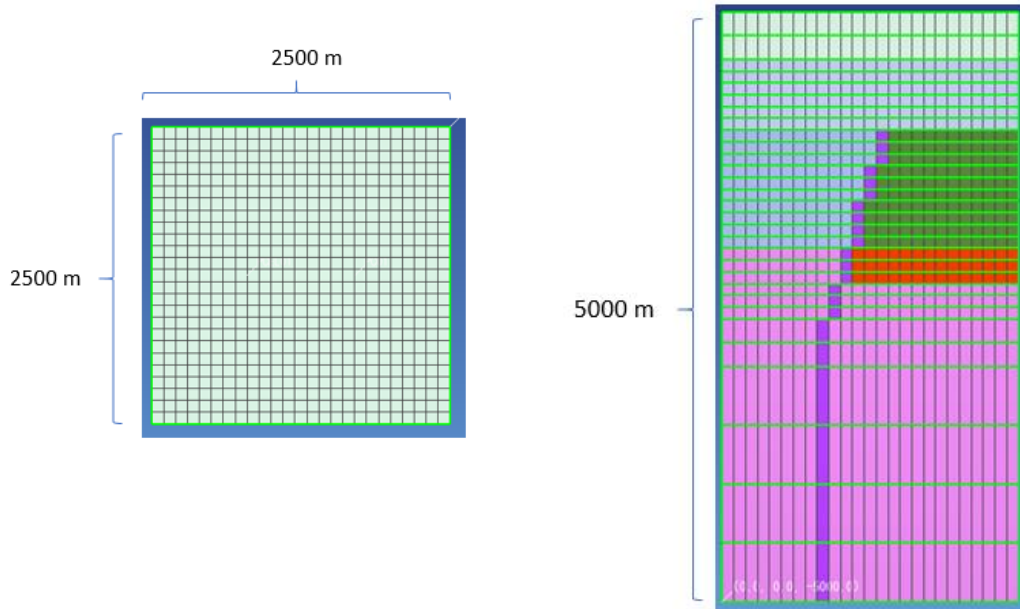


Fig. 29 Geometría del modelo computacional.

Una vez definida la geometría del modelo se asignan las capas del mismo, las cuales generalmente son análogas a los estratos litológicos, aunque estrictamente no es necesario crear un modelo de capas acorde a la litología, hace del modelo más sencillo de entender, dependiendo del número de celdas se tendrá mayor estabilidad numérica, por ello, para este caso las capas litológicas se dividirán en subcapas, las cuales se explicaran a detalle en el tema “mallado del modelo” de este capítulo.

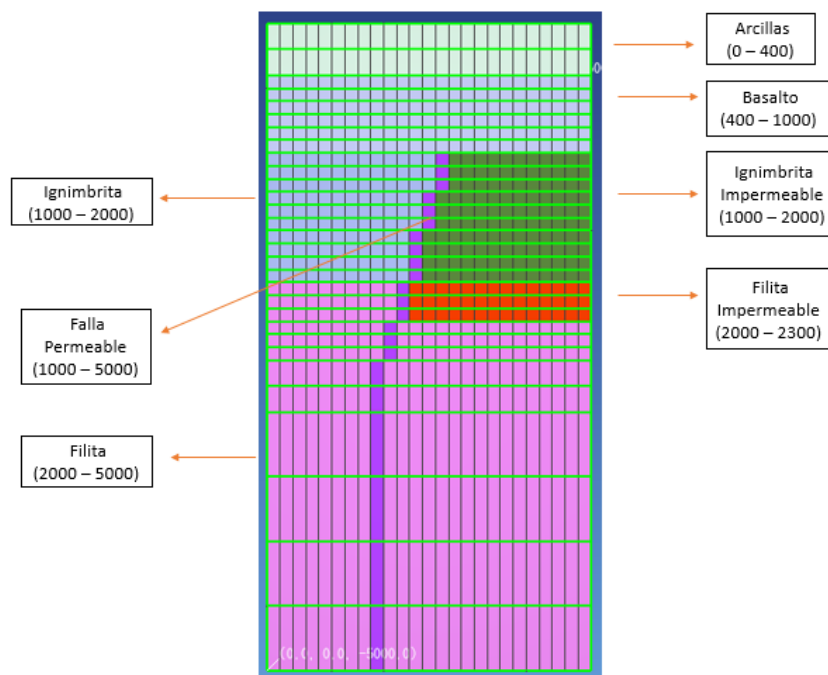


Fig. 30 Arreglo litológico en el modelo computacional.

De acuerdo con las figuras 27 y 28 se procede a discretizar y simplificar el modelo geológico, para integrar la información de este al modelo computacional quedando de la siguiente forma:

- Arcillas de 0 a 400 m.
- Basaltos de 400 a 1000 m.
- Ignimbritas de 1000 a 2000 m.
- Ignimbritas de baja permeabilidad de 1000 a 2000 m.
- Filitas de 2000 a 5000 m.
- Filitas de baja permeabilidad de 2000 a 2300 m.
- Falla la cual se considera un cuerpo de alta permeabilidad de 1000 a 5000 m.

Dicho arreglo litológico es implementado en el modelo computacional, tal como se muestra en la figura 30, el cual se basa en información obtenida por el modelo geológico, pero también por información obtenida de la perforación de pozos y registros PT, dado que como se menciona en el capítulo 3.2, la litología del modelo puede tener la función de condición de frontera, lo cual se detallará en el tema “condiciones iniciales y de frontera” correspondiente a este capítulo.

### 3.3.3.- Mallado del modelo.

Una vez definida la geometría del modelo se construye la malla, medio por el cual el modelo numérico efectúa los cálculos del flujo de fluidos y calor, la malla estará en función del método numérico que resuelva las ecuaciones de flujo, para el caso de TOUGH2, este utiliza el método de diferencias finitas, por ello la malla a utilizar es de tipo regular, asimismo la calidad de la malla para este caso se considera que es buena dado que como se muestra en la figura 31, las dimensiones de las celdas, respecto al tamaño del modelo muestran una malla con refinado aceptable.

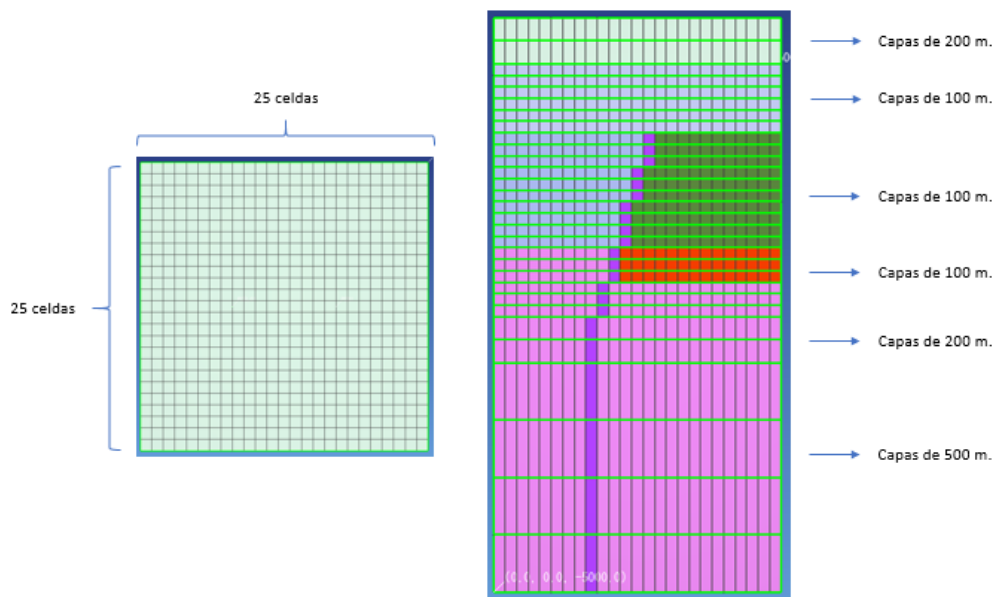


Fig. 31 Arreglo del mallado del modelo de simulación.

A continuación, se detalla el arreglo del mallado propuesto para este trabajo:

- El número de celdas en los ejes es de  $X=25$ ,  $Y=25$ , es decir cada celda respecto a las dimensiones del modelo mide  $X=100$  m,  $Y=100$  m.
- En el eje Z, se jerarquiza el número de capas de acuerdo con las zonas de interés, para este caso, la zona de interés es de 400 a 2600 m, siendo esta la zona donde las capas son más finas y por lo tanto. la estabilidad numérica en dicha zona es mayor, es decir, los resultados son más precisos.
- Zona de arcillas, 400 m de espesor, dividida en dos capas de 200 m cada una.
- Zona de basaltos, 600 m de espesor, dividida en seis capas de 100 m cada una.
- Zonas de ignimbritas, 1000 m de espesor, dividida en diez capas de 100 m cada una.
- Zona de filitas, 3000 m de espesor, divididas en tres grupos de capas, el primer grupo de filitas (someras) subdivididas en seis capas de 100 m cada una, segundo grupo de filitas (intermedias) subdivididas en dos capas de 200 m cada una, tercer grupo de filitas (profundas) subdivididas en cuatro capas de 500 m cada una.

Dicho arreglo es propuesto de acuerdo al modelo geológico, información obtenida de registros de pozos, así como de las condiciones iniciales y de frontera, dado que en las zonas donde el interés es mayor, corresponde a donde el mallado es más fino, para este caso, el mallado es más fino en las capas, es decir, en el eje Z, dado que para este caso, el flujo de calor que afecta directamente al yacimiento geotérmico es el correspondiente a eje vertical, por ello la importancia de que los cálculos sean más precisos en dichas zonas de interés siendo para este caso de 1000 a 2000 m de profundidad, esto, de acuerdo a la geometría del modelo.

### ***3.3.4.- Integración de pozos al modelo.***

Un modelo de simulación ya sea estático o dinámico, necesita de información puntual, la cual muchas veces se obtiene de pozos, pero dada la etapa del proyecto, no se sabe cuál será el posible comportamiento del yacimiento y el flujo de los fluidos al pozo, inclusive la integración de pozos a modelos de simulación son herramientas que ayudan al ingeniero de yacimientos a predecir el flujo de un pozo el cual físicamente no se encuentra en sitio, pero es un prospecto para perforación, siendo el modelo de simulación la herramienta que predecirá dicho comportamiento, o bien en fases exploratorias, cuando se tiene un modelo estático, se pueden inferir posibles zonas donde el flujo de fluidos y de calor sean de interés y se realicen corridas de simulación dinámicas asumiendo la integración de un pozo en dicha zona.

Para este trabajo se utilizará información de dos pozos exploratorios, ubicados en un yacimiento del centro norte de México, donde se asume que se encuentra en fase exploratoria, es decir, el objetivo de ambos pozos es el de descubrir la existencia de recursos geotérmicos (yacimiento geotérmico). Por ello la presencia de ambos pozos, los cuales se encuentran desviados, así como se muestra en la figura 32, siendo la finalidad de la desviación de ambos pozos, abarcar el mayor espesor posible e identificar barreras significativas a la permeabilidad vertical.

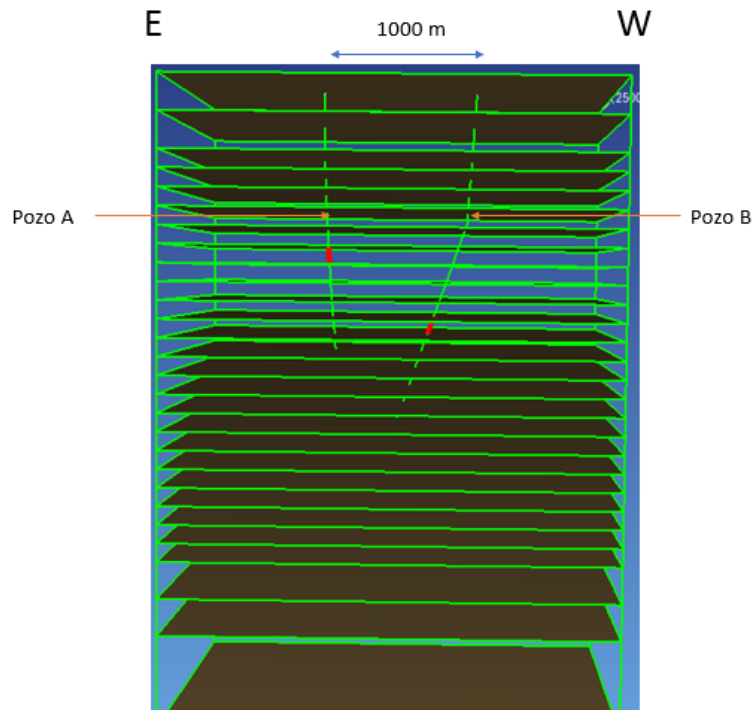
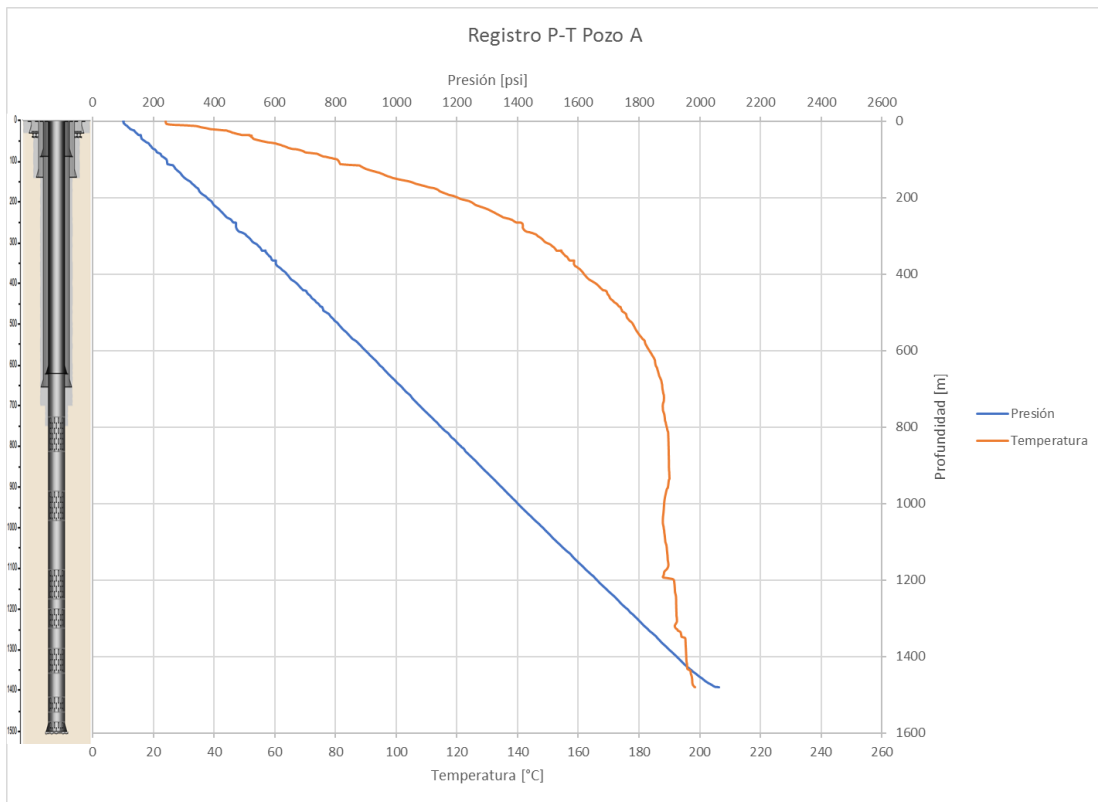


Fig. 32 Ubicación de pozos en el modelo.

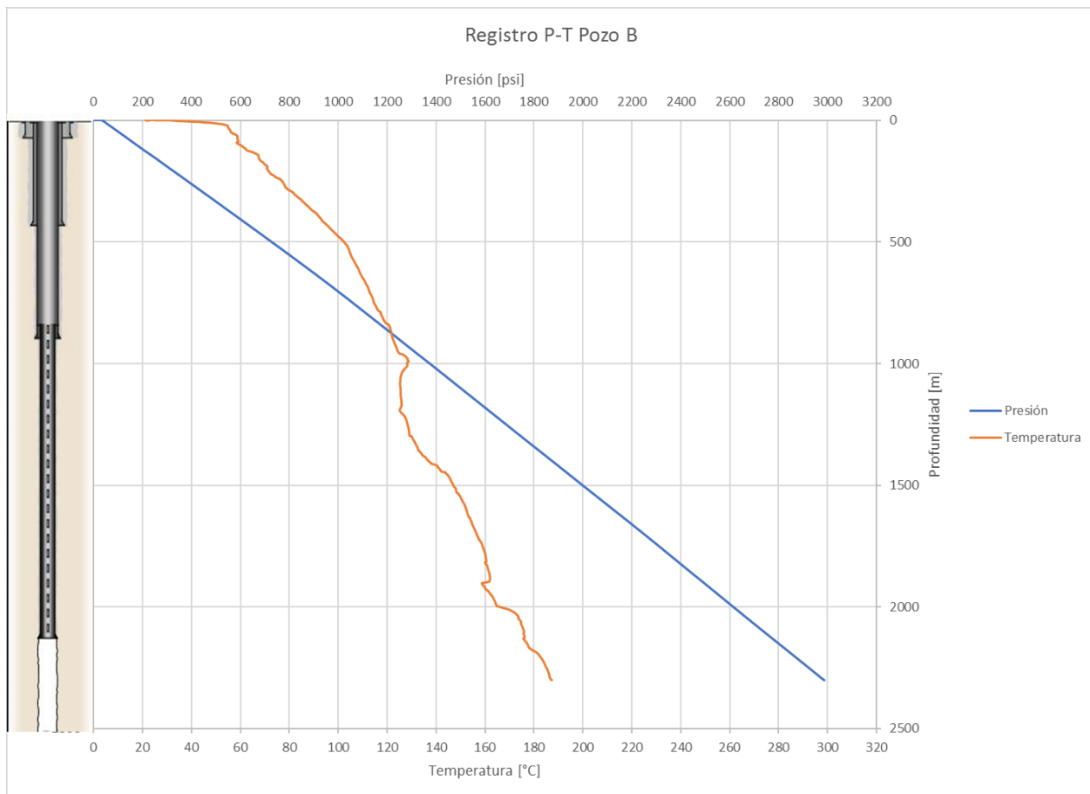
### **Interpretación de registros de pozos P-T.**

Se cuenta con información de dos pozos exploratorios de los cuales se tiene su respectivo registro presión temperatura. La información que se obtenga a partir de la interpretación que se les dé a dichos registros, va a ser la que mayor información aporte al modelo numérico de simulación, dado que este brindará el perfil de presión y temperatura, zonas de aporte de fluidos, así como el posible modelo térmico que existe en la zona, dado que con el perfil de cada pozo se realizan correlaciones y se obtiene un posible modelo térmico el cual puede funcionar como un parámetro de calibración.

A continuación, en las figuras 33 y 34 se muestran los registros P-T del pozo A y B los cuales fueron tomados cuando el pozo se encontraba estático, es decir no había flujo hacia la superficie.



*Fig. 33 Registro P-T del pozo A.*

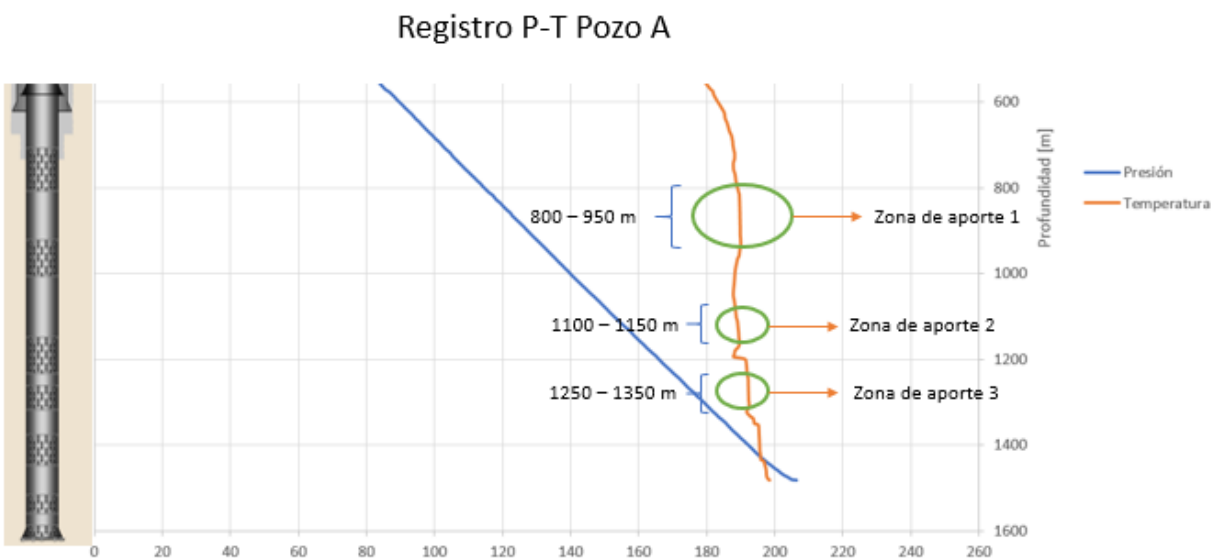


*Fig. 34 Registro P-T del pozo B.*

Como se mencionó anteriormente, a un registro P-T se le puede extraer información relevante no solo para modelos numéricos de simulación, sino también para la intervención de estos en el momento en que se deba realizar alguna reparación.

De acuerdo con lo mostrado en la figura 33, correspondiente al registro del pozo A, se observa un gradiente térmico anormal, dado que a los 200 m de profundidad se registra una temperatura de 120°C, siendo que el gradiente térmico normal de la tierra es de un incremento de 30°C por cada kilómetro de profundidad. Asimismo, además de obtener el gradiente térmico que para el caso del pozo A es de **133.33 [°C/km]** se obtiene información como lo son las zonas de aporte del pozo, en la figura 35 se muestran las zonas de aporte de la formación, la cual es un extracto de la figura 33.

En la figura 35 se observan tres zonas de aporte de fluidos de alta temperatura, esto debido a que en las tres zonas se observa que en la curva de temperatura no hay pendiente lo cual muestra el efecto de convección de calor, es decir, que por movimiento de fluidos a alta temperatura esta permanece constante, asimismo, previo a que la curva no tenga pendiente, metros más someros la curva tiene pendiente positiva dado que muestra el fenómeno de conducción de calor, es decir que a mayor profundidad la temperatura también será mayor, una vez terminada la zona de aporte de fluidos en donde la curva de temperatura permanece constante se observa un cambio de pendiente la cual es negativa, es decir que la temperatura disminuye, lo cual es indicativo de una zona ladrona o permeable, ya que tiene la capacidad de recibir fluidos.



*Fig. 35 Zonas de aporte, registro pozo A.*

Tal como se interpreta el registro P-T para las zonas de aporte correspondientes al pozo A, sucede de igual manera para el pozo B, donde se identifican dos zonas de aporte de fluidos de alta temperatura los cuales se observa en la figura 36, el cual es un extracto de la figura 34, identificando además de las zonas de aporte un gradiente térmico de **81.3 [°C/km]**. En las dos zonas se observa que en la curva de temperatura no hay pendiente lo cual muestra el efecto de convección de calor, es decir, que por movimiento de fluidos a alta temperatura esta permanece constante, asimismo, previo a que la curva no tenga pendiente, metros más someros la curva tiene pendiente positiva dado que muestra el fenómeno de conducción de calor, es decir que a mayor profundidad la temperatura también será mayor, una vez terminada la zona de aporte de fluidos en donde la curva de temperatura permanece constante se observa un cambio de pendiente la cual es negativa, es decir que la

temperatura disminuye, lo cual es indicativo de una zona ladrona o permeable, ya que tiene la capacidad de recibir fluidos.



Fig. 36 Zonas de aporte, registro pozo B.

De acuerdo a la anterior se identifican las zonas de aporte en cada pozo, sin embargo, dicha información debe integrarse al modelo de simulación el cual es un modelo estático, es decir, que solo simulará el flujo de calor desde su estado inicial hasta el tiempo actual, mismo que fungirá como base para correr un modelo dinámico, por ello, las zonas de aporte tendrán la función de puntos de observación dentro del modelo, es decir, que con el flujo de calor en el tiempo, el resultado final sea el mismo al obtenido en campo con los registros P-T de los pozos A y B.

Dado que el software utilizado para la simulación de flujo (PetraSim) solo permite cargar una zona de aporte por pozo, se toman las más significativas, recordando que de acuerdo al arreglo del mallado, dichas zonas de aporte o para este caso puntos de observación, deben coincidir con alguna de las celdas del modelo, por ello para el pozo A se toma como punto de observación el correspondiente al intervalo (900 – 1000 m) y para el pozo B el intervalo de (1300 – 1400 m), tal como se muestra en la figura 37.

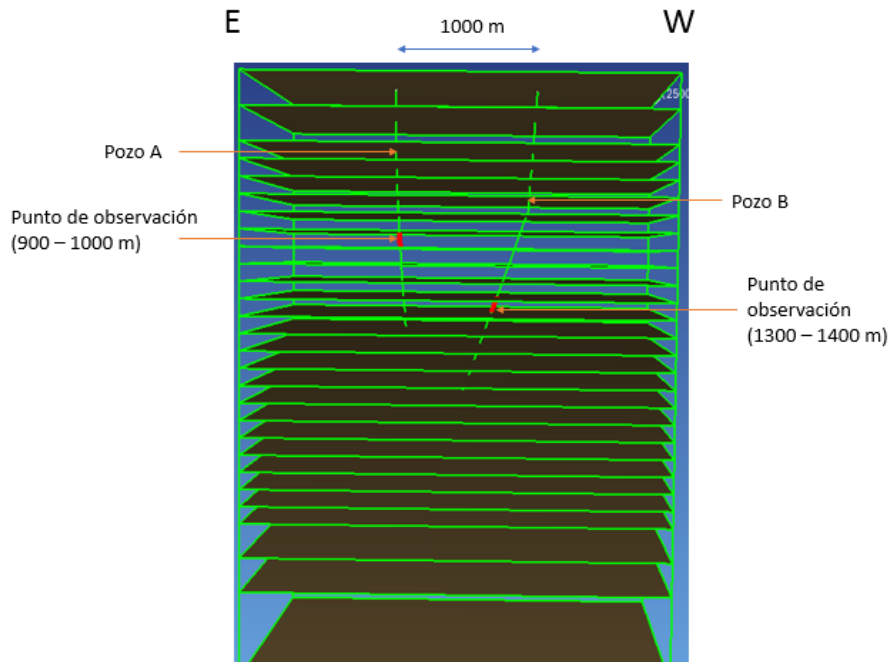


Fig. 37 Ubicación de los puntos de observación en el modelo de simulación.

### 3.4.5.- Condiciones iniciales y de frontera.

Previo a correr el modelo numérico de simulación el cual previamente fue alimentado de información obtenida por geología, geofísica y registros de pozos, es necesario proporcionar los datos con los cuales comenzará a calcular, es decir las condiciones en el tiempo inicial y sus fronteras, mismas que deberán estar definidas si cambiarán o no con el tiempo.

Dichas condiciones estarán dadas de acuerdo con la información obtenida principalmente de geología y registros de pozos, considerando que las propiedades petrofísicas y termodinámicas del modelo son las que darán pauta a las condiciones iniciales y de frontera, es pertinente mencionar que, al construir modelos de simulación, generalmente las condiciones iniciales y de frontera se asumen al no tener gran certeza de la veracidad de estas.

#### Condiciones iniciales.

Las condiciones iniciales para este modelo se darán en función de las propiedades físicas de las rocas, siendo las más sensibles las correspondientes a la permeabilidad, conductividad térmica y calor específico.

En la figura 38 se muestran los parámetros de entrada correspondientes a las rocas del modelo, recordando que cada capa litológica está integrada por capas de celdas (figura 30), por ello a cada celda se le asignan valores petrofísicos de la roca correspondiente, para este caso cada celda tiene un valor asignado de densidad, porosidad, permeabilidad en las tres direcciones, conductividad térmica y calor específico.



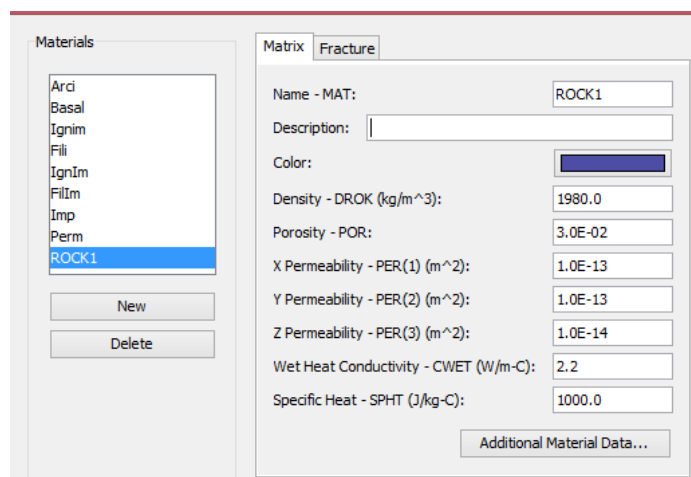


Fig. 38 Interfaz de PetraSim para entrada de datos petrofísicos.

### Condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera para este modelo son consideradas como los contornos de la geometría del modelo, pero también cuenta con fronteras internas, las cuales estarán en función de la variación de las propiedades petrofísicas de la roca.

Para el caso de las condiciones de frontera que se consideran como los contornos de la geometría del modelo, se realiza una analogía del modelo, asumiendo que este es una caja, la base y la tapa contarán con valores fijos de presión y temperatura, es decir los valores de presión y temperatura al interior del modelo estarán en ese rango, los cuales fueron asignados, por lo cual, para este caso el eje vertical (Z) es el más significativo en cuanto a condiciones de frontera corresponde, dado que se cuenta con una condición de frontera de fondo y una de superficie, tal como se muestra en las figuras 39 y 40.

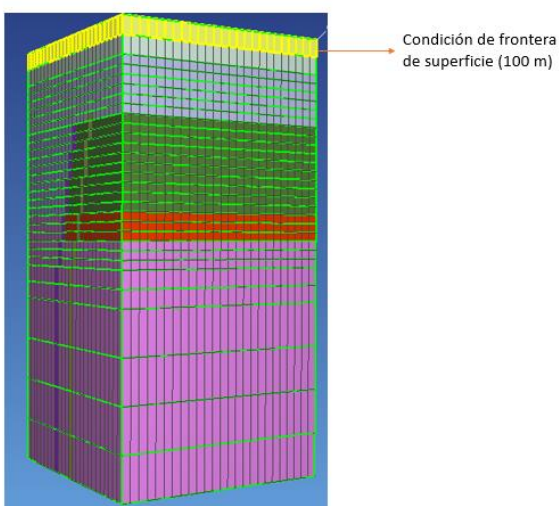


Fig. 39 Condición de frontera de superficie.

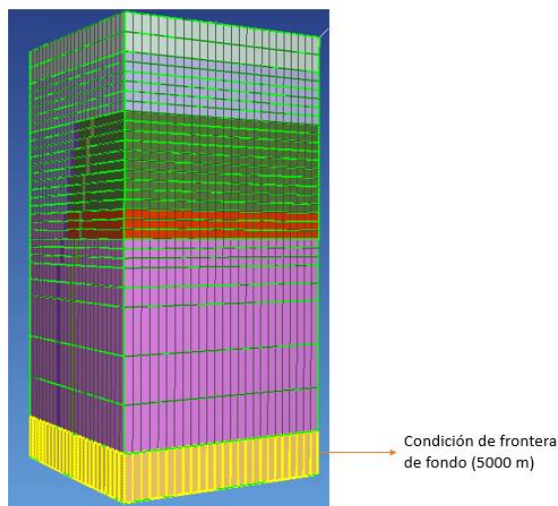


Fig. 40 Condición de frontera de fondo.

Para este modelo de simulación las condiciones de frontera son dadas de acuerdo con la información brindada por los registros P-T la cual es extrapolada y así como con información de geociencias, se determina la presión temperatura en el fondo y superficie, las cuales se muestran en la tabla 2.

Condiciones de Frontera			
Superficie		Fondo	
Presión [psi]	Temperatura [°C]	Presión [psi]	Temperatura [°C]
14.69	25	6613.72	230

Tabla 2 Condiciones de frontera geométricas.

Para el caso de las paredes del modelo, no se les asigna valores de condiciones de frontera dado que el software (PetraSim) asume que todos los valores posteriores al contorno de su geometría son igual a cero, es decir, que no hay materia ni fenómenos físicos que afecten al modelo de simulación. Asimismo, no se asignan condiciones de frontera en el contorno del modelo, dado que no hay existencia ni certeza de datos que puedan aportar información de una frontera.

Cuando se tienen variaciones significativas en las propiedades petrofísicas de las rocas, que serán asignadas a ciertas celdas o capas en específico, se considera como una condición de frontera interna, para el caso de este modelo se cuenta con tres condiciones de frontera internas, las cuales son afectadas por los parámetros petrofísicos más sensibles de la roca, es decir, la permeabilidad en las tres direcciones, aunque la permeabilidad vertical es la más significativa, la conductividad térmica y la porosidad.

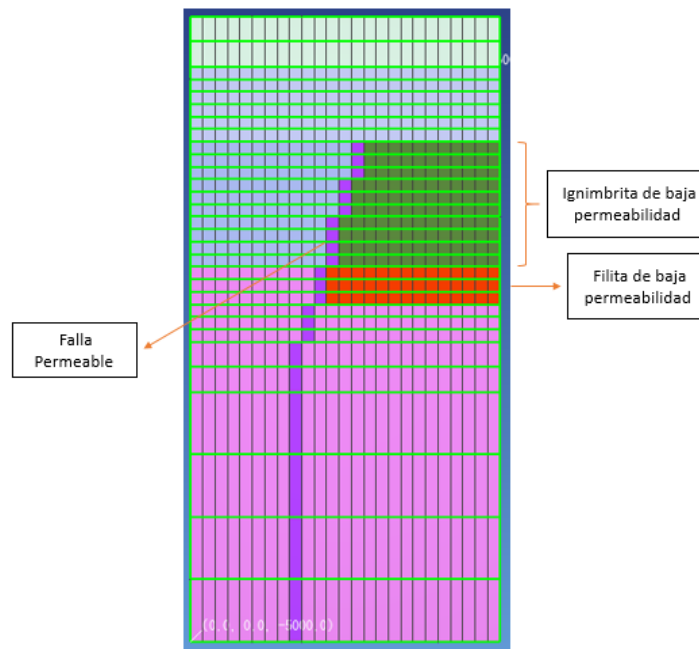


Fig. 41 Condiciones de frontera internas.

Para este modelo se infirieron tres cuerpos, los cuales son afectados con el cambio de propiedades antes mencionadas, en la figura 41 se muestra el arreglo de dichos cuerpos los cuales se describen a continuación.

- Falla permeable. Desde el procesamiento del modelo geológico (figuras 27 y 28) se infiere una falla por la cual el ascenso del calor por convección se hace presente, lo cual es corroborado en los registros P-T, dado que a menor profundidad, el pozo A tiene mayor temperatura que el pozo B, por lo cual se asume que dicha falla permite el ascenso de calor de forma más abundante, siendo que la conductividad térmica

permeabilidad y porosidad en este cuerpo es significativamente mayor a los demás cuerpos identificados en la figura 41.

- Ignimbrita de baja permeabilidad. Como se muestra en la figura 41, se infiere la presencia de un cuerpo de baja permeabilidad, dado que, como se muestra en los registros P-T de los pozos A y B (figuras 33 y 34) en el pozo A, a menor profundidad la temperatura es mayor debido al flujo de calor que aporta la falla, sin embargo, para poder lograr que la temperatura sea menor en la zona del pozo B, debe haber una restricción al flujo, lo cual se logra con un cuerpo impermeable.
- Filita de baja permeabilidad. Como se muestra en la figura 41, la zona de baja permeabilidad es más profunda a la zona de las ignimbritas, esto debido a que, sin dicho espesor adicional, ayuda a que la temperatura sea menor en dicha zona y así emular lo mostrado en los registros P-T de los pozos A y B.

### **3.4.6.- Tiempo de simulación y pasos de tiempo.**

Una vez que se tiene el modelo construido y cargado con todos los datos disponibles, se dispone a correr dicho modelo, para este modelo de simulación numérica se le da un tiempo de simulación de 200,000 años, dado que el objetivo de este modelo es recrear el flujo de calor para la conformación del yacimiento geotérmico, asimismo es necesario ordenar al software los pasos de tiempo requeridos para hacer la simulación, para este caso PetraSim utiliza el método del gradiente conjugado, lo cual permite al usuario ingresar cada cuando realizar dicho paso de tiempo, sin embargo conforme el método va resolviendo los sistemas de matrices, incrementa el paso de tiempo de manera automática.

## **3.4. Conclusiones del capítulo.**

Realizar un modelo de simulación numérica de yacimientos no debe considerarse una receta de cocina, ya que cada caso o cada yacimiento es diferente, si bien se consideran yacimientos los cuales pueden ser análogos, estos no se comportan de la misma manera, por lo cual el realizar un buen modelo de simulación con la información disponible radica en la habilidad de entender e integrar la información disponible al momento, en el modelo computacional, asimismo es importante comprender o tener una hipótesis del comportamiento del yacimiento o los resultados de la simulación.

Realizar un modelo de simulación implica asumir ciertos parámetros y condiciones de los cuales no se tiene certeza, asimismo el modelado numérico de yacimientos no debe considerarse un procedimiento a seguir haciendo analogía a una receta de cocina, dado que a pesar de tener una metodología, cada yacimiento mostrará comportamientos diferentes, si bien, establecer una metodología para procesar la información e incluirla al modelo se considera como una buena práctica, esta estará sujeta al criterio del modelador o ingeniero de yacimientos, dado que los criterios de mallado, fronteras e interpretación de la información será diferente, asimismo es pertinente mencionar que incluso el método de solución elegido por el modelador afectará los resultados, sin embargo a pesar de que los criterios sean diferentes, con la información disponible acerca del comportamiento del yacimiento, el modelo debe arrojar resultados similares al comportamiento observado físicamente.

Para realizar un modelo de simulación numérica, este debe ser construido por etapas e incluso bajo criterios de prueba y error, generalmente se recomienda comenzar a construir modelos básicos y sencillos, los cuales se irán mejorando hasta obtener un modelo más complejo que arroje resultados satisfactorios, dado que realizar un modelo complejo no es tarea fácil, inclusive, conforme se van obteniendo los datos del modelo, este se va construyendo y mejorando.

Con lo anterior se pueden obtener conclusiones sobre el comportamiento del yacimiento, o bien realizar análisis en donde es necesario invertir en la obtención de información, asimismo un modelo de simulación preliminar, puede ser una herramienta para apoyar a las geociencias en dictaminar nuevas posibles zonas de interés de exploración o incluso para perforación de pozos.

## ***Capítulo 4. Análisis de resultados.***

La simulación numérica de yacimientos como rama de la ingeniería de yacimientos, permite la óptima caracterización de los yacimientos que a su vez permite predecir el comportamiento de estos, por ello, en este capítulo se muestran los resultados del proceso descrito en el capítulo 3.

Los resultados a continuación mostrados son producto de la integración de todos los datos disponibles obtenidos de campo, desde la litología, la ubicación del yacimiento geotérmico, así como de la interpretación térmica del yacimiento, la cual se infiere a partir de los registros P-T de los pozos en sitio, asimismo es necesario mencionar que lo a continuación presentado es resultado de la aproximación numérica realizada por el software, el cual será validado por el modelo térmico del sitio, el cual es obtenido a partir de los datos de los registros P-T de los pozos que hay en la zona de estudio.

#### 4.1.- Perfil de temperatura.

Como se detalla en el capítulo 4, el objetivo del modelo numérico de simulación es recrear el flujo de calor en el medio poroso, es decir, que a partir de las condiciones iniciales se obtenga el perfil de temperatura que da origen al yacimiento geotérmico. Por tanto, después de haber realizado la corrida de simulación a 200,000 años se presenta lo siguiente.

Al software se le ordeno entregar impresiones de pantalla cada cierto paso de tiempo, lo cual permite observar de manera gráfica el ascenso de la temperatura respecto al tiempo, para este trabajo el software entregó cuatro impresiones de pantalla que muestran el comportamiento de las isothermas del modelo.

En la figura 42 se observa la primera impresión la cual corresponde al año 8.5 del periodo de simulación, en ella se observa que, debido al periodo tan corto del tiempo de simulación, las isothermas aun no alcanzan un nivel considerable en el ascenso de la temperatura, siendo las condiciones iniciales y de frontera las que gobiernan la distribución de temperatura, dado que prácticamente todo el modelo se encuentra a 25°C.

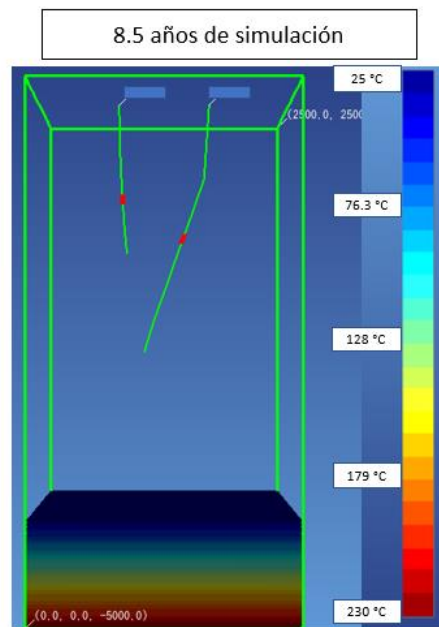


Fig. 42 Simulación a 8.5 años.

La figura 43 corresponde a la segunda impresión en la cual se observa el comportamiento de las isothermas a un tiempo de simulación de 62,000 años, en ella se observa que el ascenso de la temperatura ha abarcado el modelo

casi en su totalidad, sin embargo, solo las zonas profundas cuentan con temperaturas de entre 120 y 230°C, asimismo el ascenso de la temperatura se observa casi homogénea, es decir las zonas de preferencia de flujo tales como las zonas permeables y la falla aun no son significativas para el flujo de calor.

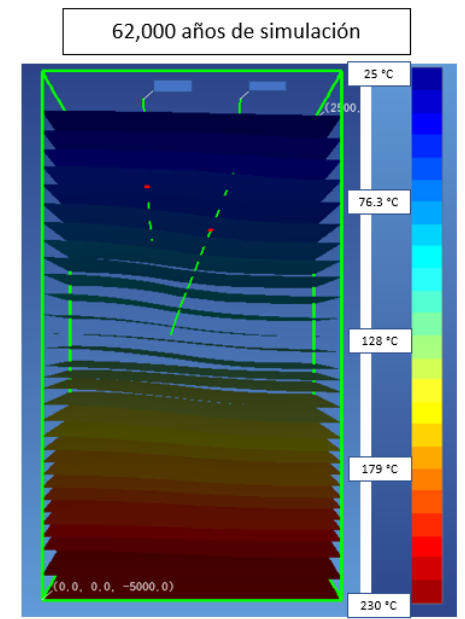


Fig. 43 Simulación a 62,000 años.

En la figura 44 se observa la tercera impresión la cual corresponde al año 164,000 del periodo de simulación, en ella se observa que, el modelo en su totalidad ha sido afectado por el ascenso de la temperatura, asimismo se muestra una anomalía en las isotermas, dado que el flujo de calor muestra su tendencia por las zonas preferenciales de flujo, es decir, por las zonas permeables y la falla, lo cual da como resultado que la zona izquierda del modelo cuenta con temperaturas mayores a menor profundidad, respecto a la zona derecha del modelo.

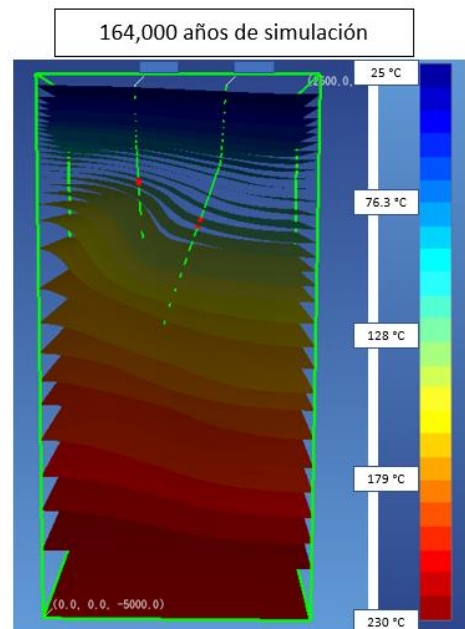


Fig. 44 Simulación a 164,000 años.

La figura 45 corresponde a la cuarta y última impresión en la cual se observa el comportamiento de las isotermas a un tiempo de simulación de 200,000 años, en ella se observa el resultado final de la simulación, es decir el arreglo de las isotermas en el tiempo actual, asimismo, se observa que la anomalía térmica que se muestra en la figura 44 es más prolongada en su pendiente para la última impresión, asimismo se observan temperaturas de entre 130 y 170°C en la zona de interés (yacimiento), lo cual indica que el flujo de calor es predominante en la zona de la falla.

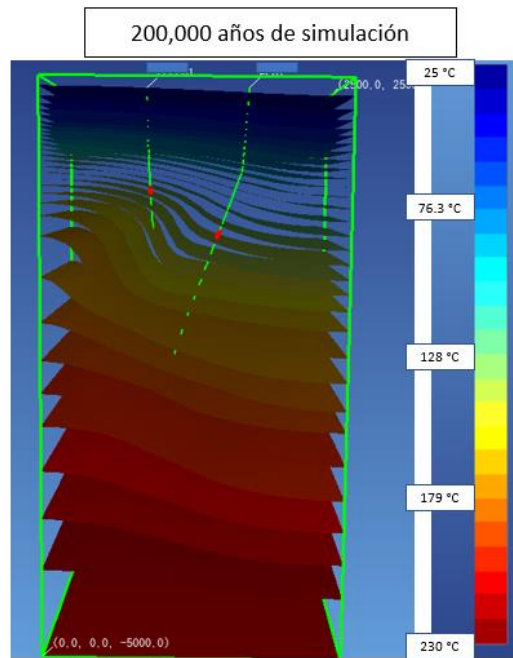


Fig. 45 Simulación a 200,000 años.

#### **4.2.- Puntos de observación.**

Las zonas principales de aporte de cada pozo son utilizadas como puntos de observación, lo cual muestra la evolución de la temperatura en cada punto de observación, recordando que el punto de observación correspondiente al pozo A se encuentra en el intervalo de 900 a 1000 m, mientras que el del pozo B en el intervalo de 1300 a 1400 m.

En el punto de observación del pozo A, figura 46 se muestra el comportamiento de dicha celda a lo largo del tiempo de simulación, dicho comportamiento corresponde a un régimen de flujo de tipo pseudo estacionario, en el cual el flujo de calor por medio de la convección genera dicha curva, de acuerdo con el comportamiento de la curva, se puede inferir que está por llegar al régimen de flujo estacionario.



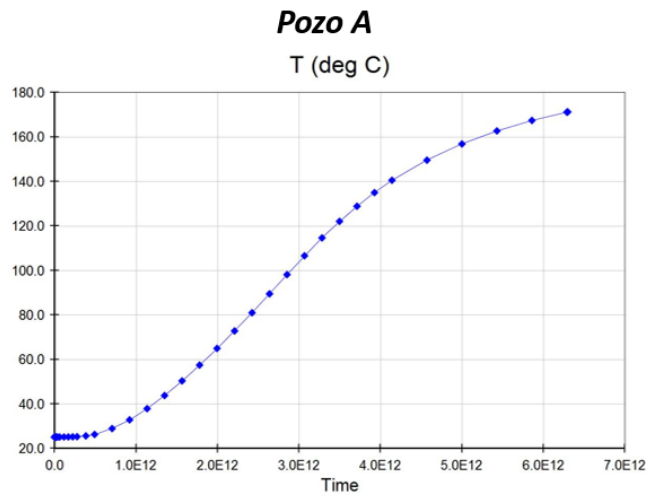


Fig. 46 Perfil de temperatura, punto de observación pozo A.

En el caso del punto de observación del pozo B, figura 47, se observa un comportamiento similar al del punto de observación del pozo A, figura 46, en donde el régimen de flujo corresponde a pseudo estacionario y de igual manera se puede inferir que está por llegar al régimen de flujo de flujo estacionario.

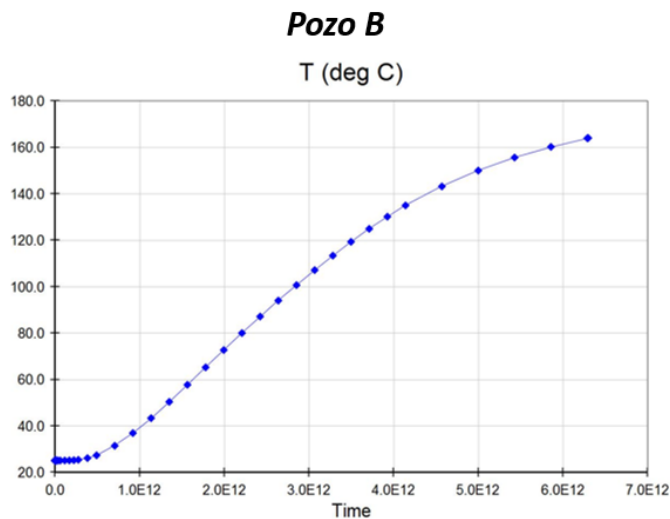


Fig. 47 Perfil de temperatura punto de observación pozo B.

### 4.3.- Validación del modelo.

Con lo mostrado en los capítulos 4.1 y 4.2 se tienen los resultados finales de la simulación numérica del estado inicial del yacimiento, pero dichos resultados deben validarse con la información que se tiene disponible hasta el momento, con la información de los registros P-T de los pozos A y B, se podía realizar el modelo térmico de la zona, al ser estos, datos medidos en el sitio de estudio, se pueden tomar para realizar la validación del modelo, por ello dicha información fue interpolada y se obtiene lo mostrado en la figura 48.

### Modelo térmico de la zona de estudio

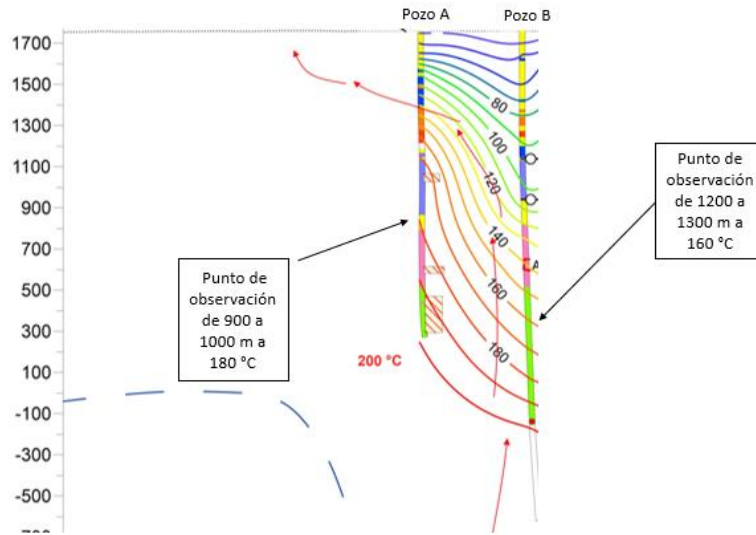


Fig. 48 Modelo térmico de la zona de estudio.

De acuerdo con lo mostrado en la figura 48 el cual es modelo térmico de la zona de estudio, se muestran las isotermas que de acuerdo con la información obtenida de los registros P-T de los pozos A y B, se infiere son las que se tienen en el yacimiento.

A continuación, se muestra la comparativa entre el modelo térmico obtenido con los datos de los registros P-T de los pozos A y B con los resultados del modelo de simulación numérica, como se observa, en la figura 49 se muestran las isotermas de cada modelo, las cuales geoméricamente son muy similares, asimismo en el modelo térmico se muestra el ascenso de los fluidos a través de la falla, la cual en el modelo de simulación hace que la temperatura incremente en el lado izquierdo, recordando que la relación que tienen ambos fenómenos es causado por la convección térmica, por otro lado, numéricamente el punto de observación del pozo A en el modelo térmico tiene una temperatura de 180°C, mientras que el calculado por el modelo de simulación es de 175°C, en el caso del punto de observación del pozo B, el modelo térmico tiene una temperatura de 160°C, mientras que el modelo de simulación es de 162°C, por lo cual los resultados del modelo de simulación son muy similares a lo que se tiene en el modelo térmico, el cual proviene de la información brindada por geología, geofísica y los registros de pozos P-T.

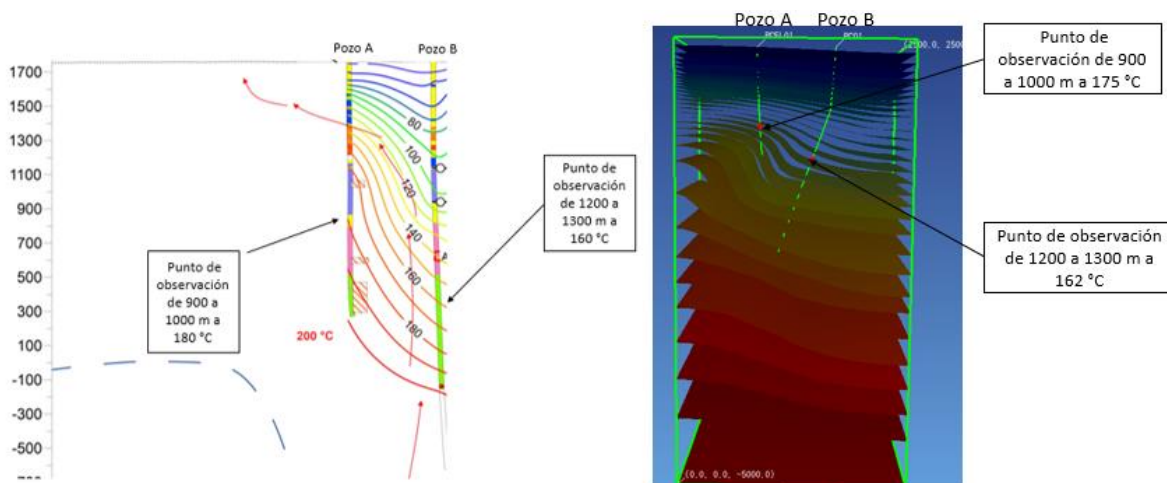


Fig. 49 Comparativa de modelos térmico y de simulación.

#### **4.4.- Conclusiones del capítulo.**

Realizar un modelo numérico de simulación no solo implica cargar datos a un software, sino tener una hipótesis del comportamiento esperado, asimismo es necesario analizar cada uno de los datos de entrada dado que de la forma en que estos sean ingresados al modelo numérico, tendrán impacto sobre los resultados finales.

Para este trabajo, los resultados obtenidos son muy similares a los medidos en campo, dado que con todas las consideraciones geológicas y térmicas que tiene el modelo, se pudo llegar a dicho resultado, asimismo el obtener dichos resultados conllevó un proceso de prueba y error, dado que parámetros tan sensibles como la permeabilidad y conductividad térmica de elementos del modelo como la falla o la zona de baja permeabilidad, no se tenía certeza de sus valores exactos, por lo tanto fue necesario probar con una serie de valores que dieran como resultado lo mostrado en este modelo de simulación.

Es necesario recordar que un modelo de simulación numérica aproxima las soluciones numéricas a las analíticas cuando estas se conocen, por ello la aproximación obtenida por PetraSim en este modelo de simulación en comparación con el modelo térmico real, se considera muy buena, dado que los valores de temperatura calculados por el software son casi idénticos a los mostrados en el modelo térmico.

# ***Conclusiones.***

Un modelo de simulación numérica de yacimientos no debe considerarse una receta de cocina o una serie de pasos a seguir, dado que cada caso o yacimiento es diferente, realizar un buen modelo de simulación con la información disponible, radica en la habilidad de analizar e integrar la información disponible en el modelo computacional, asimismo es necesario contar con una hipótesis del comportamiento del yacimiento o de los posibles resultados de la simulación.

De acuerdo con los objetivos de realizar un modelo de simulación y con la corrida de un modelo preliminar, dependiendo el caso, se realiza un análisis en donde es necesario invertir dinero para la adquisición de información, asimismo un modelo de simulación preliminar, puede ser una herramienta para apoyar a las geociencias en dictaminar nuevas posibles zonas de interés de exploración o incluso para perforación de pozos.

Construir un modelo de simulación implica asumir ciertos parámetros y condiciones de los cuales no se tiene certeza, por ello, el establecer una metodología para procesar la información e incluirla al modelo se considera como una buena práctica, pero esta, estará sujeta al criterio del modelador o ingeniero de yacimientos, dado que los criterios de mallado, fronteras e interpretación de la información estará sujeta a la interpretación de cada individuo. Para realizar un modelo de simulación numérica, lo recomendable es que este sea construido por etapas e incluso bajo criterios de prueba y error, generalmente se recomienda comenzar a construir modelos básicos y sencillos, los cuales irán adquiriendo mejoras hasta obtener un modelo más complejo que arroje resultados satisfactorios (los cuales son validados con la información disponible en ese momento), dado que realizar un modelo complejo no es tarea fácil, inclusive, conforme se van obteniendo los datos del modelo, este se va construyendo y mejorando.

Los resultados obtenidos para este trabajo de tesis son muy similares a los mostrados por el modelo térmico, el cual se obtiene de los valores medidos por los registros P-T de los pozos A y B, debido a las consideraciones geológicas y térmicas que se incluyen en el modelo, se obtienen dichos resultados, asimismo el obtener dichos resultados conllevó un proceso de prueba y error, dado que parámetros tan sensibles como la permeabilidad y conductividad térmica de elementos del modelo como la falla o la zona de baja permeabilidad, no se tenía la certeza de sus valores exactos, por lo tanto, fue necesario probar con una serie de valores que dieran como resultado lo mostrado en este modelo de simulación.

Si bien este modelo de simulación es considerado un modelo preliminar, dado que por sus dimensiones, este es relativamente pequeño, idealmente y con la adquisición de más información, este debería ser geométricamente más grande y a su vez complejo, dado que fuera de las fronteras se desconoce si hay anomalías térmicas así como su comportamiento, el realizar un modelo más grande y complejo ayuda a caracterizar de mejor manera el yacimiento en su totalidad, ya que con los resultados obtenidos en este trabajo de tesis, solo se puede predecir el posible comportamiento de únicamente una zona del yacimiento.

Asimismo, es necesario recordar que un modelo de simulación numérica aproxima las soluciones numéricas a las analíticas cuando estas se conocen, por ello la aproximación obtenida por PetraSim en este modelo de simulación en comparación con el modelo térmico real, se considera muy buena, dado que los valores de temperatura calculados por el software son casi idénticos a los mostrados en el modelo térmico.

# Referencias.

- Andraca Gutiérrez, FABIÁN HUEMATZIN. y Rodríguez Marian, JOSÉ ROBERTO. (2012). *Modelado Inicial Para Yacimientos Geotérmicos Durante La Etapa De Exploración* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma De México, Ciudad de México, México.
- Cacho Carranza, YURELI. (2018). Estado de la Energía Geotérmica en México. *Petroquimex*. <https://petroquimex.com/estado-de-la-energia-geotermica-en-mexico/>
- Calzada Olivares, ROGELIO. y Olivares Garcés, JUAN CARLOS. (2015). *Conceptos De Geotermia Para Ingenieros Petroleros* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma De México, Ciudad de México, México.
- Castillo, ALEXANDER. (2012). Ecuación diferencial de transferencia de calor y sus aplicaciones en ingeniería. <https://es.slideshare.net/jalexanderc/ecuacin-diferencial-de-transferencia-de-calor-y-sus-aplicaciones-en-ingeniera>
- Castillo, DIEGO. y De la Cruz, VICTOR. (2011). *Reconocimiento estructural y volcanológico en la zona termal del Domo San Pedro Lagunillas, Nayarit, México*. <http://www.revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/view/39494/35927>
- Centro integral de Desarrollo del Talento. Taller Productividad de Pozos.
- Cortés Rosas, JESUS JAVIER. (2006). *Introducción al Análisis numérico y tratamiento de errores*. <http://www.ingenieria.unam.mx/~pinilla/Intro/Introduccion.pdf>
- Curso S.E.D. (2010). Estado estacionario, Condiciones y Sesgo inicial. Recolección y Análisis de Resultados. <https://www.fing.edu.uy/inco/cursos/simulacion/archivos/clases/clase07web.pdf>
- Delgado Cid, DANIEL y Juárez Ortega ROBERTO ILDAIR. (2014). *PROCESOS DE PERFORACIÓN Y TERMINACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS* (tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Drilling Engineer Job Profile, Prospects.ac.uk
- Duque, DANIEL. (2011). Condiciones de Contorno. *Geometría Computacional*. <https://dcain.etsin.upm.es/~daniel/ProyectoInvestigador/node27.html>
- Economides, MICHAEL J. (2014). *The Role of Petroleum Production Engineering*.
- Engineering New Zealand, Wairakei Geothermal Power Development.
- Facultad de Ingeniería, UNAM. (2019). Aproximación numérica y errores. Plataforma educativa para Análisis Numérico Auspiciado por el proyecto PAPIME PE105717. [http://www.ingenieria.unam.mx/~pinilla/PE105117/pdfs/tema1/1\\_aproximacion\\_numerica\\_y\\_errores.pdf](http://www.ingenieria.unam.mx/~pinilla/PE105117/pdfs/tema1/1_aproximacion_numerica_y_errores.pdf)
- Fernández, GERMÁN. (2010). Aproximación numérica y errores. *FISICOQUÍMICA*. <http://apuntescientificos.org/ecuacion-estado-ibq.html>
- Ferrari Mora, DARIO. (2018). *METODO DEL ELEMENTO FINITO Y AutoFEM®*. [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m1/Elemento\\_finito\\_Autofem.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/Elemento_finito_Autofem.pdf)

- Frias Valero, EDUARDO. (2004). *APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS DE FLUJO AXIAL MEDIANTE LA APLICACION DEL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS* (tesis doctoral). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.
- Grijalva Montoya, ADRIÁN. Modelo Conceptual Hidrogeológico. *Hidroestratigrafía del Acuífero de Valle del Río Yaqui, Sonora*. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/18919/Capitulo4.pdf>
- Gudmundur S. Bodvarsson (1986). Modeling Of Geothermal Systems. *Journal Of Petroleum Technology*.
- Hernández Ochoa Abel F. (2012). Modelación Numérica De Yacimientos Geotérmicos Con Aplicación En México. Seminario De Modelación Matemática Y Computacional. Instituto De Geofísica UNAM. México.
- Influencia de la calidad de la malla en las simulaciones. Uso de condiciones de contorno periódicas. *Calidad de malla y condiciones de contorno periódicas*. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3848/fichero/Volumen+%C3%9Anico%252F07.ANEXO+I.pdf>
- Laboratorio de Propulsión Aeronáutico. (2011). Condiciones de Contorno. [http://webserver.dmt.upm.es/zope/DMT/Members/jmtizon/libre-eleccion/old/7\\_ccontorno.pdf](http://webserver.dmt.upm.es/zope/DMT/Members/jmtizon/libre-eleccion/old/7_ccontorno.pdf)
- La Comunidad Petrolera. (2009) Ingeniería de yacimientos.
- Mendoza Bernal, OMAR JONATHAN. (2016). *Resolución de Ecuaciones Diferenciales Parciales Mediante el Método de Diferencias Finitas y su Paralelización* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Ortega Jiménez, GUSTAVO. (2013). *Análisis E Interpretación De Pruebas De Presión En Pozos Geotérmicos Exploratorios* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma De México, Ciudad de México, México.
- Ortega Jiménez, GUSTAVO. (2018). Registros de Pozo Presión - Temperatura. *Notas de Clase Ingeniería de Yacimientos Geotérmicos*. Ciudad de México, México.
- PEMEX Exploración y Producción-Instituto Mexicano Del Petróleo. *Manual de Especialidad En Ingeniería Petrolera*. Ingeniería de Producción de Pozos y Productividad de Pozos. México.
- Pérez, LUIS E. (2002). *ECUACIONES DE CONTINUIDAD*. [http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos\\_ecuaciones\\_continuidad.pdf](http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_ecuaciones_continuidad.pdf)
- Pérez Martínez, ANDRÉS. (2017). *Aplicación del Método Magnetotérmico en la Exploración de un Sistema Geotérmico* (tesis de licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma De Puebla, Puebla de Zaragoza, México.
- Petróleo Colmex. *Fuentes para la Historia del Petróleo en México, 1900-2008*. México.
- Prol Ledesma, ROSA MARÍA. y Morán Zenteno, DANTE JAIME. (2018). Heat Flow And Geothermal Provinces In Mexico. *ScienceDirect, Geothermics*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650518302189>
- Puig Adam P., *Curso teórico-práctico de ecuaciones diferencias aplicado a la Física y Técnica*. Biblioteca Matemática (1950), págs. 300-303
- Quijano León, JOSÉ LUIS. (2007). *Manual De Geotermia, Ciencias De La Tierra E Ingeniería De Reservorios*. México.
- Rojas, FRANCISCO. (2016). Grupo Dragón pronto pondrá en marcha la Unidad 3 de 25,5 MW en Domo de San Pedro, México. *Piensa En Geotermia*. <http://www.piensageotermia.com/grupo-dragon-ponto-pondra-en-marcha-la-unidad-3-de-255-mw-en-domo-de-san-pedro-mexico/>
- Sánchez, JAVIER. Ley de Darcy. Conductividad Hidráulica. [http://hidrologia.usal.es/temas/Ley\\_Darcy.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf)
- School of Minerals and Energy Resources Engineering. (2015). Reservoir engineering. 2015, de UNSW. <https://www.engineering.unsw.edu.au/minerals-energy-resources/what-we-do/what-do-mining-engineers-do/reservoir-engineering>

- Secretaria de Energía. (2006). Fuentes Renovables De Energía, Hacia una Estrategia Mexicana para el Desarrollo Sustentable en un Mundo en Transición. México.
- Seminario Vasquez, RICARDO. *METODOS NUMERICOS PARA INGENIERIA*. <https://disi.unal.edu.co/~lctorress/MetNum/LiMetNu2.pdf>
- Soto Benavides, MANUEL HERIBERTO. (2001). *CALIBRACIÓN DE DOS MODELOS DE SIMULACIÓN INTEGRAL DE CUENCA, PARA LA HOYA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PURAPEL, ESTACIÓN NIRIVILO* (tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca, Talca, Chile.
- Soto Pineda, LUIS. Elementos De Perforación. *Origen del Petróleo y Evolución de la Perforación*. Ciudad de México, México.
- Takahashi, KEN. ¿Qué son modelos numéricos? <http://www.met.igp.gob.pe/modelos/modelos.html>
- Thunderhead Engineering. (2017). Boundary and Initial Conditions. PetraSim Manual 2017. <https://www.rockware.com/downloads/documentation/petrasim/PetraSimManual-2017.pdf>
- Thunderhead. (2017). *User Manual PetraSim 2017*. <https://www.rockware.com/downloads/documentation/petrasim/PetraSimManual-2017.pdf>
- Von Flatern, RICK. (2013). Fundamentos de las pruebas de pozos. *DEFINICIÓN DE LAS OPERACIONES DE PRUEBAS*. <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/definicion-operaciones>