

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA PETROLERA**



PROYECTO DE GRADO

**DISEÑO DE LA INGENIERÍA CONCEPTUAL PARA EL
SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA Y
PLANTA DE ENERGÍA GEOTERMOELÉCTRICA EN SOL DE
MAÑANA POTOSÍ**

Postulante: ARNOLD ROBERT QUISBERT COPA

Tutor: ING. JUAN FERNANDO CUEVAS BANDA

**LA PAZ – BOLIVIA
2022**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

A mi familia

A mi querida Madre:

Ana María Copa Chambi

A mis hermanos:

Yori Raúl Quisbert Copa

Eric Ademar Quisbert Copa

Luis Miguel Quisbert Copa

Por todo su apoyo, confianza, paciencia y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiarme en los momentos difíciles y poner en mi vida personas tan especiales que espero no defraudar.

A mi familia por el apoyo económico y moral que fue determinante en los momentos más difíciles de la universidad.

A los docentes de la carrera de Ingeniería Petrolera por toda la enseñanza recibida durante mi vida académica.

A mis compañeras y compañeros por todo su apoyo y animo que me brindaron durante mis estudios.

Al Ing. Fernando Cuevas Banda por todo su apoyo y recomendaciones realizadas para la elaboración de este proyecto.

Al Ing. Pedro Reynaldo Marín Domínguez, director de carrera por su apoyo y confianza en mi vida académica.

Al personal administrativo de la universidad con los cuales llegamos a formar buenas amistades.

Viendo un poco atrás a mi exprofesor Walter Vargas Chávez, que me ayudo a encaminar la carrera que hoy estoy concluyendo.

*Y finalmente a esa persona especial que durante **más de 3 años** compartimos muchos momentos especiales y agradables pero que al final no termino muy bien. Ahora solo nos queda mirar adelante y continuar, espero de todo corazón defiendas tu Proyecto y cumplas todos esos sueños y metas que te trazaste. Te lo dije antes y te lo digo ahora "La vida puso muchas pruebas muy fuertes y difíciles que lograste avanzar y para mí al igual que para muchas personas te consideramos **VALIENTE** y **GUERRERA**, sé que de ahora en adelante te espera cosas muy buenas, sobresaldrás en lo que quieras, **TU FUTURO SERÁ BRILLANTE** te lo mereces"*

INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES	2
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3.1. <i>Identificación del problema</i>	4
1.3.2. <i>Formulación del problema</i>	4
1.4. OBJETIVOS	4
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.5. JUSTIFICACIÓN	5
1.5.1. <i>Justificación Técnica</i>	5
1.5.2. <i>Justificación Económica</i>	5
1.5.3. <i>Justificación Social</i>	5
1.5.4. <i>Justificación Ambiental</i>	5
1.6. ALCANCE.....	6
1.6.1. <i>Alcance Temático</i>	6
1.6.2. <i>Alcance Geográfico</i>	7
1.6.3. <i>Alcance Legal</i>	7
CAPÍTULO II.....	9
MARCO TEORICO Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES	9
2.1. INTRODUCCIÓN	9
2.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES EN GENERACIÓN GEOTÉRMICA.....	9
2.2.1. <i>Conceptos de geotermia</i>	9
2.2.2. <i>Energía geotermia</i>	9
2.2.3. <i>Calor</i>	9
2.2.4. <i>Sistemas geotérmicos</i>	10
2.2.5. <i>Yacimientos geotérmicos</i>	14
2.2.5.1. <i>Fuente de calor</i>	16
2.2.6. <i>Recurso geotérmico y recurso hidrotermal</i>	16
2.2.7. <i>Tipos de recurso</i>	18
2.2.8. <i>Fluido geotérmico</i>	18
2.2.9. <i>Mecanismos de transferencia de calor</i>	19
2.2.10. <i>Inercia térmica</i>	19
2.2.11. <i>Gradiente geotérmico</i>	19
2.2.12. <i>Flujo de calor</i>	20
2.3. GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	21
2.4. TIPOS DE CENTRALES DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA	21
2.4.1. <i>Plantas de Vapor Húmedo (Flash)</i>	21
2.4.1.1. <i>Planta geotérmica tipo Single Flash</i>	21
2.4.1.2. <i>Planta geotérmica tipo Double/Triple Flash</i>	24
2.4.2. <i>Planta de energía Vapor Seco</i>	25

2.4.3.	<i>Planta de energía Ciclo Binario</i>	27
2.4.3.1.	Ciclo binario ORC básico.....	27
2.4.3.2.	Ciclo binario ORC recuperativo.....	29
2.4.3.3.	Ciclo binario ORC de presión dual.....	29
2.4.3.4.	Ciclo binario Kalina.....	31
2.4.4.	<i>Sistemas Geotérmicos Hídricos</i>	33
2.4.4.1.	Ciclo combinado Flash – Binario.....	34
2.4.4.2.	Ciclo integrado Flash – Binario.....	35
2.5.	SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.....	35
2.5.1.	<i>Clasificación de subestaciones eléctricas</i>	37
2.5.1.1.	Subestaciones eléctricas por nivel de tensión.....	37
2.5.1.2.	Subestaciones electricas por su funcionalidad.....	38
2.5.1.3.	Subestaciones eléctricas por área de servicio.....	38
2.5.1.4.	Subestaciones electricas por su aislamiento.....	39
2.5.2.	<i>Subestaciones eléctricas en plantas generadoras de energía</i>	40
CAPÍTULO III.....		41
CONCEPTOS BÁSICOS DE TERMODINÁMICA.....		41
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	41
3.2.	ENERGÍA Y TRANSFERENCIA DE ENERGÍA.....	41
3.2.1.	<i>Formas de Energía</i>	41
3.2.1.1.	Energía Mecánica.....	43
3.2.2.	<i>Transferencia de Energía por Calor</i>	44
3.2.2.1.	Calor en termodinámica.....	45
3.2.3.	<i>Transferencia de Energía por Trabajo</i>	46
3.2.3.1.	Trabajo eléctrico.....	48
3.2.4.	<i>Formas mecánicas del trabajo</i>	48
3.2.4.1.	Trabajo de flecha.....	49
3.2.4.2.	Formas no mecánicas del trabajo.....	50
3.2.5.	<i>Primera ley de la Termodinámica</i>	50
3.2.5.1.	Balance de energía.....	51
3.2.5.2.	Incremento de la energía de un sistema, $\Delta E_{\text{sistema}}$	51
3.2.5.3.	Mecanismos de transferencia de energía, E_{entrada} y E_{salida}	52
3.2.6.	<i>Eficiencia en la conversión de energía</i>	54
3.2.6.1.	Eficiencia de dispositivos mecánicos y eléctricos.....	54
3.3.	PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS PURAS.....	56
3.3.1.	<i>Sustancia pura</i>	56
3.3.2.	<i>Fases de una sustancia pura</i>	56
3.3.3.	<i>Procesos de cambio de fase en sustancias puras</i>	57
3.3.3.1.	Líquido comprimido y líquido saturado.....	57
3.3.3.2.	Vapor saturado y vapor sobrecalentado.....	58
3.3.3.3.	Temperatura de saturación y presión de saturación.....	60
3.3.4.	<i>Diagramas de propiedades para procesos de cambio de fase</i>	60
3.3.4.1.	Diagrama T-v.....	60
3.3.4.2.	Diagrama P-v.....	60
3.3.4.3.	Diagrama P-T.....	61
3.3.5.	<i>Tablas de propiedades</i>	62

3.3.5.1. Entalpía: una propiedad de combinación	62
3.3.5.2. Mezcla saturada de líquido-vapor.....	62
3.3.5.3. Vapor sobrecalentado	63
3.3.5.4. Líquido comprimido.....	63
3.4. CALORES ESPECÍFICOS.....	64
3.5. DISPOSITIVOS DE FLUJO ESTACIONARIO	65
3.5.1. Turbinas y Compresores	65
3.5.2. Válvulas de Estrangulamiento.....	66
3.5.3. Intercambiadores de Calor	66
3.5.4. Flujos en tuberías y ductos.....	67
3.6. ENTROPÍA	68
CAPÍTULO IV	70
PRODUCCIÓN Y DESARROLLO DE LA ENERGIA GEOTERMICA LAGUNA COLORADA – POTOSÍ.....	70
4.1. INTRODUCCIÓN	70
4.2. LUGAR DE EMPLAZAMIENTO DEL PROYECTO.....	70
4.3. CAMPO SOL DE MAÑANA DE LAGUNA COLORADA COMO ALTERNATIVA EN GENERACIÓN GEOTÉRMICA.....	72
4.4. ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOQUÍMICO	73
4.4.1. Estudio Geológico.....	74
4.4.1.1. Estratigrafía	74
4.4.1.2. Estructura Geológica.....	75
4.4.1.3. Zona de Alteración Hidrotermal	77
4.4.2. Estudio Geoquímico.....	78
4.4.2.1. Características del Fluido de Reservorio	78
4.4.2.2. Incrustación	79
4.5. DATOS DE PERFORACIÓN DE LOS POZOS EXISTENTES	80
4.6. PRUEBAS DE PRODUCCIÓN (PRUEBAS DE LOS POZOS).....	80
4.6.1. Inspección visual de cabezales	81
4.6.2. detalle de la pruebas de produccion	81
4.7. ESTRUCTURA DEL RESERVORIO.....	85
4.8. FUENTE DE CALOR.....	86
4.9. FLUIDO GEOTÉRMICO.....	86
4.10. ESTRUCTURA DEL RESERVORIO.....	87
4.11. CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	88
4.12. CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN AÉREA.....	89
4.13. MANEJO E IMPACTOS ESPECIFICOS DE LA INDUSTRIA	91
4.14.1. Medio ambiente	91
4.14.1.1. Efluentes.....	91
4.14.1.1.1. Fluidos y detritos de perforación	91
4.14.1.1.2. Fluidos geotérmicos usados	92
4.14.1.2. Emisiones a la atmósfera.....	93
4.14.1.3. Residuos sólidos	94
4.14.1.4. Reventones en pozos y fallos en las tuberías	94
4.14.1.5. Consumo y extracción del agua.....	95
4.15. HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO	95

4.15.1. Gases geotérmicos.....	95
4.15.2. Espacios cerrados	96
4.15.3. Calor.....	96
4.15.4. Ruido.....	97
4.15.5. Metodología	97
4.15.5.1. Fase de Preparación.....	97
4.15.5.2. Elección del método.....	97
4.15.5.2.1. Identificación de peligros	99
4.15.5.2.2. Estimación y valoración del riesgo.....	99
4.15.5.2.3. Control del riesgo.....	100
4.15.6. ANALISIS DE DATOS	101
4.15.6.1. Valoración del Riesgo	101
4.15.7. Higiene y seguridad en la comunidad	102
4.15.7.1. Ácido sulfhídrico	102
4.15.7.2. La seguridad de la infraestructura	102
4.15.7.3. Los efectos de las actividades en los recursos hídricos	103
4.16. COSTO DE LA ENERGIA GEOTERMICA.....	103
CAPÍTULO V	106
DISEÑO Y APLICACIÓN PRÁCTICA - PROYECTO PLANTA GEOTÉRMICA LAGUNA	
COLORADA	106
5.1. INTRODUCCIÓN	106
5.2. PROGRAMA DE PERFORACIÓN DE POZOS SOL DE MAÑANA.....	106
5.3. CONDICIONES AMBIENTALES EN EL CAMPO SOL DE MAÑANA	107
5.4. RECOLECCION DE FLUIDOS Y SISTEMA DE REINYECCION.....	108
5.4.1. Trazo de la tubería.....	108
5.4.2. Proceso.....	108
5.5. INSTALACIONES DE LA PLANTA GENERADORA	109
5.5.1. Diseño.....	109
5.5.1.1. Diseño de la planta generadora.....	109
5.5.1.2. Diseño del equipo.....	113
5.5.2. Trabajos de Arquitectura y obra Civil	113
5.5.2.1. Camino de acceso	113
5.5.2.2. Preparación del sitio.....	113
5.5.2.3. Planta Generadora.....	113
5.5.3. Equipo para la planta generadora	114
5.5.3.1. Equipo Mecánico.....	114
5.5.3.2. Equipo eléctrico y de control.....	115
5.5.3.3. Equipo de control e instrumentación	117
5.5.3.4. Instalaciones para la conservación del ambiente.....	117
5.6. SELECCIÓN DEL TIPO DE TECNOLOGÍA O PLANTA GEOTÉRMICA	119
5.7. SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE LA PLANTA TIPO SINGLE FLASH	121
5.7.1. Separador de vapor.....	122
5.7.2. Turbinas	123
5.7.3. Condensadores.....	125
5.7.4. Torres de Refrigeración.....	126
5.7.4.1. Tipos de Torre de enfriamiento.....	126

5.8.	SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA PARA UNA PLANTA TIPO SINGLE FLASH.....	128
5.9.	CICLO TERMODINÁMICO DE LA PLANTA GEOTÉRMICA	129
5.9.1.	<i>Proceso intermitente.....</i>	130
5.9.2.	<i>Proceso de separación.....</i>	130
5.9.3.	<i>Proceso de expansión de la turbina</i>	131
5.9.4.	<i>Proceso de condensación</i>	132
5.9.5.	<i>Proceso de la torre de enfriamiento.....</i>	133
5.10.	METODOLOGÍA DE CÁLCULO LOS EQUIPOS PRINCIPALES DE LA PLANTA GEOTÉRMICA	134
5.10.1.	<i>Calculo y dimensionamiento del Separador Ciclónico.....</i>	134
5.10.2.	<i>Cálculo de la Turbomáquina.....</i>	137
5.10.3.	<i>Cálculo del Intercambiador de Calor.....</i>	139
5.10.4.	<i>Cálculo de la Torre de Enfriamiento.....</i>	139
5.10.4.1.	<i>Temperatura de Bulbo Húmedo.....</i>	140
5.10.4.2.	<i>Temperatura de bulbo seco.....</i>	140
5.11.	LINEA DE TRANSMISIÓN Y SUBESTACIÓN.....	141
5.11.1.	<i>Subestación</i>	141
5.11.2.	<i>Línea de transmisión</i>	142
5.11.3.	<i>Diagrama unifilar subestación eléctrica.....</i>	142
CAPÍTULO VI.....		144
INGENIERÍA Y DISEÑO TÉCNICO DEL PROYECTO.....		144
6.1.	INTRODUCCIÓN	144
6.2.	DATOS DE PARTIDA.....	144
6.3.	SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES DE LA PLANTA GEOTÉRMICA	145
6.3.1.	<i>CÁLCULO del separador de vapor</i>	145
6.3.1.1.	<i>Condiciones en el separador</i>	145
6.3.1.2.	<i>Condiciones de entrada y dimensionamiento del separador de vapor.....</i>	148
6.3.1.3.	<i>Especificaciones generales de diseño del separador ciclónico</i>	150
6.3.2.	<i>Cálculo y especificaciones de la turbomáquina</i>	151
6.3.2.1.	<i>Condiciones de entrada a la turbomáquina.....</i>	151
6.3.2.2.	<i>Calculo a la salida de la turbina</i>	152
6.3.2.3.	<i>Especificaciones técnicas de la turbomáquina.....</i>	156
6.3.3.	<i>Cálculo del intercambiador de calor.....</i>	157
6.3.4.	<i>Cálculo y selección de la torre de enfriamiento de tiro inducido</i>	159
6.3.5.	<i>Válvulas de estrangulamiento</i>	163
6.4.	SELECCIÓN DEL GENERADOR ELECTROMECAÁNICO	164
6.4.1.	<i>Especificaciones técnicas del generador electromecánico</i>	164
6.5.	TRANSFORMADOR ELÉCTRICO	166
6.6.	SIMULACIÓN EN THERMOFLEX	166
6.6.1.	<i>Descripción del simulador Thermoflex.....</i>	166
6.6.2.	<i>Tipos de plantas diseñadas con Thermoflex.....</i>	167
6.6.3.	<i>Descripción de la pantalla del software.....</i>	168
6.6.4.	<i>Condiciones y parámetros de ingreso a Thermoflex</i>	169
6.6.5.	<i>Detalle de los resultados en las unidades lanzadas por Thermoflex</i>	170
6.6.5.1.	<i>Steam Flash Tank.....</i>	170

6.6.5.2. Moisture separator	171
6.6.5.3. ST GROUP.....	171
6.6.5.4. Generator	173
6.6.5.5. Wather Cooled Condenser	173
6.6.5.6. Wet Cooling Tower.....	174
CAPÍTULO VII	176
EVALUACION ECONOMICA	176
7.1. INTRODUCCIÓN	176
7.2. BALANCE DE ENERGIA ELÉCTRICA EN BOLIVIA.....	176
7.2.1. <i>Demanda de Potencia</i>	176
7.2.2. <i>Potencia instalada en el SIN</i>	178
7.2.3. <i>generacion electrica del sin.</i>	178
7.2.4. <i>Aprovechamiento de energías primarias por empresas del SIN</i>	181
7.2.5. <i>Uso efectivo de la energía renovable</i>	182
7.2.5.1. <i>Lineamientos de precios de combustibles para la generación de electricidad</i> 184	
7.3. PROYECTO LAGUNA COLORADA.....	184
7.3.1. <i>Costos Base</i>	185
7.3.2. <i>Costos Unitarios de construcción y generación por kW</i>	185
7.4. EVALUACIÓN FINANCIERA	187
7.4.1. <i>Método de evaluación</i>	187
7.4.2. <i>Condiciones de Evaluación</i>	188
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	190
8.1. CONCLUSIONES.....	190
8.2. RECOMENDACIONES.....	191
BIBLIOGRAFÍA	192
ANEXOS	197

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Principales características geotérmicas de los Países Andinos.....	3
Tabla 2.1: Temperatura crítica (T_c) y presión crítica (P_c) para distintos fluidos de trabajo.	30
Tabla 4.1: Resumen de los pozos exploratorios Sol de Mañana.....	72
Tabla 4.2: Resumen perforación pozos existentes.	80
Tabla 4.3: Especificaciones principales de la línea de transmisión.	89
Tabla 4.4: Identificación de peligros en la estimulación química de pozos.	99
Tabla 4.5: Valoración del riesgo para “Demarcación de espacio en plataforma”.....	101
Tabla 4.6: Costos de capital de una planta geotérmica.	104
Tabla 4.7: Comparación de costos de capital con otras fuentes de energía.....	104
Tabla 4.8: Costes de operación y mantenimiento de una planta geotérmica.....	105
Tabla 4.9: Comparación de costos de operación y mantenimiento con otras fuentes de energía.	105
Tabla 5.1: Datos técnicos pozos existentes del campo Sol de Mañana.....	106
Tabla 5.2: Datos técnicos pozos proyectados a perforar del campo Sol de Mañana.	107
Tabla 5.3: Datos meteorológicos en el lugar de emplazamiento del proyecto.....	107
Tabla 5.4: Calidad del aire en el lugar de emplazamiento del proyecto.....	108
Tabla 5.5: Principales especificaciones de la turbina.....	114
Tabla 5.6: Especificaciones del generador.....	116
Tabla 5.7: Especificaciones de otros equipos mayores.....	116
Tabla 5.8: Características del fluido geotérmico Sol de Mañana.....	119
Tabla 5.9: Parámetros aceptables para plantas de expansión súbita.....	120
Tabla 5.10: Datos admisibles de diseño para el separador de vapor.....	136
Tabla 5.11: Principales características del equipo de la subestación.....	141
Tabla 6.1: Datos recopilados de los 4 pozos geotérmicos.....	144
Tabla 6.2: Características técnicas del fluido geotérmico.	145
Tabla 6.3: Tabla termodinámica de agua saturada - presiones.....	146
Tabla 6.4: Condiciones en el separador de vapor ciclónico.....	148
Tabla 6.5: Datos de ingreso al separador de vapor.	149
Tabla 6.6: Dimensiones del separador ciclónico.....	150
Tabla 6.7: Tabla termodinámica de agua saturada - Temperatura.....	151
Tabla 6.8: Tabla termodinámica de agua saturada - Temperatura.....	153
Tabla 6.9: Información a la salida de la turbomáquina.	155
Tabla 6.10: Especificaciones de la turbomáquina.....	156
Tabla 6.11: Tabla termodinámica de agua saturada.....	157
Tabla 6.12: Especificaciones técnicas para la selección del condensador.	158
Tabla 6.13: Datos de entrada a la torre de enfriamiento.....	159
Tabla 6.14: Condiciones en la torre de enfriamiento.....	163
Tabla 6.15: Especificaciones técnicas del generador electromecánico.	165
Tabla 6.16: Condiciones de parámetros de ingreso al simulador.....	169
Tabla 6.17: Resultados numéricos del Steam Flash Tank.....	170
Tabla 6.18: Resultados numéricos del ST Group.	172

Tabla 6.19: Resultados numéricos del Cooled Condenser.....	174
Tabla 6.20: Resultados numéricos del Wet Cooling Tower.	175
Tabla 7.1: Evolución anual de la Generación Bruta [GWh] - Período 2006 – 2020.....	177
Tabla 7.2: Empresas generadoras SIN – Potencia Instalada.	178
Tabla 7.3: Generación Eléctrica bruta de las centrales [GWh] 2020.....	179
Tabla 7.4: Evolución de la generación bruta de las centrales [GWh] 2006 – 2020.....	181
Tabla 7.5: Evolución del consumo de combustibles 2006 – 2020.....	182
Tabla 7.6: Producción de Petróleo y Gas Natural 2020.....	183
Tabla 7.7: Condiciones de operación de la Planta Geotérmica.....	186
Tabla 7.8: Costos unitarios de construcción y generación por kW.....	186
Tabla 7.9: Inversión anual para la generación eléctrica planta Laguna Colorada.	187
Tabla 7.10: Costos del proyecto por unidad.....	188
Tabla 7.11: Condiciones del préstamo.....	188
Tabla 7.12: Tarifa promedio a consumidor final gestión 2020.....	189

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Generación de CO2 en la sociedad.....	6
Figura 1.2: Ubicación del Campo Sol de Mañana y vías de acceso.	7
Figura 2.1: Uso y procesamiento de la energía geotérmica.	10
Figura 2.2: Estructura de la energía geotérmica terrestre.....	11
Figura 2.3: Yacimiento geotérmico de alta temperatura.....	12
Figura 2.4: Yacimiento geotérmico de baja temperatura.....	12
Figura 2.5: Sistemas Geotérmicos Estimulados.....	13
Figura 2.6: Esquema yacimiento geotérmico.....	15
Figura 2.7: Modelo de un sistema geotérmico.....	16
Figura 2.8: Diagrama Permeabilidad – Gradiente geotérmico.	17
Figura 2.9: Fumarolas de Laguna Colorada.	18
Figura 2.10: Mecanismos de transferencia de calor.....	19
Figura 2.11: Gradiente geotérmico terrestre.....	20
Figura 2.12: Esquema simplificado de una central tipo Flash Simple.....	22
Figura 2.13: Diagrama Temperatura – Entropía para una planta Flash Simple.	23
Figura 2.14: Esquema simplificado de un tipo central Doble Flash.....	24
Figura 2.15: Diagrama Temperatura - Entropía para una planta Flash Doble.....	25
Figura 2.16: Esquema simplificado de una central de Vapor Seco.....	26
Figura 2.17: Diagrama Temperatura - Entropía para una planta de Vapor Seco.....	26
Figura 2.18: Esquema simplificado de una central de ciclo binario ORC básico.....	28
Figura 2.19: Diagrama Presión - Entalpía para una planta de ciclo binario ORC básico.	28
Figura 2.20: Esquema simplificado de una central de ciclo binario ORC recuperativo.	29
Figura 2.21: Esquema simplificado de una central de ciclo binario ORC de presión dual.	30
Figura 2.22: Diagrama P - h para una planta de ciclo binario ORC de presión dual.	31

Figura 2.23: Esquema simplificado de una central de Ciclo Binario Kalina con un recalentador y dos precalentadores recuperativos.	32
Figura 2.24: Esquema simplificado de una central de ciclo binario Kalina con composición variable del fluido de trabajo.....	33
Figura 2.25: Esquema simplificado de una central de ciclo combinado Flash-Binario.	33
Figura 2.26: Esquema simplificado de una central de ciclo binario ORC	34
Figura 2.27: Esquema simplificado de una central de ciclo integrado Flash - Binario.....	35
Figura 2.28: Sistema eléctrico de potencia.	36
Figura 2.29: Simbología usada en los diagramas de Subestaciones.	38
Figura 2.30: Subestación eléctrica.	39
Figura 3.1: Energía mecánica mediante una turbina hidráulica y generador ideal.	44
Figura 3.2: Transferencia de calor y trabajo en un sistema cerrado.	44
Figura 3.3: Proceso adiabático, un sistema no intercambia calor con el exterior.	45
Figura 3.4: Especificaciones de la dirección de calor y trabajo.	46
Figura 3.5: Diagrama P vs V , donde el calor y trabajo son función de la trayectoria.	47
Figura 3.6: Potencia eléctrica en términos de RIV.....	48
Figura 3.7: Trabajo de fecha es proporcional al momento de torsión aplicado.	50
Figura 3.8: Volumen de control se cambia con el flujo de masa, calor y trabajo.	53
Figura 3.9: Eficiencia global de un conjunto de turbina y generador.	56
Figura 3.10: Disposición de los átomos en diferentes fases.	57
Figura 3.11: Líquido comprimido (Estado 1) y Líquido saturado (Estado 2).	58
Figura 3.12: Mezcla saturada de líquido (Estado 3) y Vapor saturado (Estado 4).	59
Figura 3.13: Estado 5 – Vapor sobrecalentado.....	59
Figura 3.14: Diagrama $T - v$ de una sustancia pura.....	60
Figura 3.15: Diagrama $P-v$ de una sustancia pura.	61
Figura 3.16: Diagrama $P - T$ de sustancias puras.....	61
Figura 3.17: Diagrama de fases líquida y de vapor mediante la calidad x	63
Figura 3.18: Calor específico de una sustancia cambia con la temperatura.	65
Figura 3.19: Balance másico en una turbina de vapor de agua.	66
Figura 3.20: Intercambiador de calor de tubo y coraza.	67
Figura 3.21: Pérdida de calor de un fluido en movimiento por la tubería.....	68
Figura 3.22: Flujo por una tubería con calentamiento eléctrico.....	68
Figura 3.23: Sistema entrópico y alrededores.	69
Figura 4.1: Ubicación geográfica de Bolivia en Sudamérica.	71
Figura 4.2: Ubicación geográfica de Sol de Mañana en Potosí.	71
Figura 4.3: Inspección de ENDE a los cabezales de pozos.	73
Figura 4.4: Mapa de los pozos exploratorios y el estudio MT.	74
Figura 4.5: Columna de secciones geológicas de los pozos geotérmicos.....	75
Figura 4.6: Mapa Geológico del campo geotérmico de Sol de Mañana.	76
Figura 4.7: Estructura geológica recopilada Sol de Mañana.....	76
Figura 4.8: Sección transversal de la alternación.	77
Figura 4.9: Estado físico de Cabezal de pozo.	79
Figura 4.10: Cabezal de pozo SM-1 – Sol de Mañana.....	82
Figura 4.11: Cabezal de pozo SM-2 – Sol de Mañana.....	82

Figura 4.12: <i>Cabezal de pozo SM-3 – Sol de Mañana</i>	83
Figura 4.13: <i>Sol de Mañana – Cabezal de pozo SM-4</i>	84
Figura 4.14: <i>Sol de Mañana – Cabezal de pozo SM-5</i>	85
Figura 4.15: <i>Sistema geotérmico Laguna Colorada</i>	86
Figura 4.16: <i>Modelo conceptual revisado del campo Geotérmico Laguna Colorada</i>	88
Figura 4.17: <i>Montaje de torres de transmisión</i>	90
Figura 4.18: <i>Fases de la evaluación del riesgo, modificado</i>	98
Figura 4.19: <i>Metodología de evaluación de riesgos</i>	98
Figura 5.1: <i>Equipo de eliminador depurador de H₂S</i>	145
Figura 5.2: <i>Separador vertical marca EATON</i>	145
Figura 5.3: <i>Partes de la Turbina de vapor</i>	145
Figura 5.4: <i>Intercambiador de coraza y tubos</i>	145
Figura 5.5: <i>Torres de refrigeración instaladas en plantas Geotérmicas</i>	145
Figura 5.6: <i>Esquema simplificado “planta tipo SINGLE FLASH”</i>	145
Figura 5.7: <i>Ciclo termodinámico en una “Planta tipo Single Flash”</i>	145
Figura 5.8: <i>Especificaciones generales de diseño para un Separador Ciclónico</i>	145
Figura 5.9: <i>Esquema del balance de energía de una turbomáquina</i>	145
Figura 5.10: <i>Trazado de la línea de Trasmisión Laguna Colorada – San Cristóbal</i>	145
Figura 6.1: <i>Esquema de balance de energías del Separador Ciclónico</i>	145
Figura 6.2: <i>Esquema de balance de energías en la turbina</i>	151
Figura 6.3: <i>Esquema de balance de energías del intercambiador de calor</i>	157
Figura 6.4: <i>Esquema de balance de energías en la torre de enfriamiento</i>	159
Figura 6.5: <i>Gráfico psicrométrico para el Bulbo Seco</i>	160
Figura 6.6: <i>Grafico psicrométrico para el Bulbo Húmedo</i>	161
Figura 6.7: <i>Disposición del generador electromecánico</i>	165
Figura 6.8: <i>Pantalla elección del tipo de programa de Thermoflex 21.0</i>	168
Figura 6.9: <i>Pantalla básica de operación del software Thermoflex 21.0</i>	168
Figura 6.10: <i>Simulación con los parámetros establecidos en Thermoflex</i>	169
Figura 6.11: <i>Grafica de Turbine Enthalpy vs Entropy</i>	172
Figura 6.12: <i>Grafico Psychrometric Chart</i>	175

INDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1: <i>Resumen de los minerales de alteración hidrotermal</i>	78
Cuadro 4.2: <i>Resumen de la Clasificación en base a los Iones disueltos</i>	78
Cuadro 4.3: <i>Matriz para la valoración del riesgo método binario simplificado</i>	99
Cuadro 4.4: <i>Acciones a que recomienda tomar el método binario simplificado</i>	100
Cuadro 5.1: <i>Ventajas y desventajas de las centrales de simple y Double Flash</i>	121
Cuadro 5.2: <i>Ventajas y desventajas de tipos de separadores</i>	122
Cuadro 5.3: <i>Comparación entre los intercambiadores de calor más comunes</i>	125
Cuadro 7.1: <i>Costos base del Proyecto – ENDE</i>	185

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 7.1: <i>Evolución anual de la generación bruta (GWh) – SIN y SA.</i>	177
Gráfico 7.2: <i>Potencia instalada en el SIN por tipo de tecnología - Gestión 2020.</i>	180
Gráfico 7.3: <i>Evolución generación bruta hidroeléctrica, termoeléctrica y alternativas [GWh] SIN.</i>	180
Gráfico 7.4: <i>Importación mensual de combustibles 2020-2021 (MMm3)</i>	183

INDICE DE PLANOS

Plano 5.1: <i>Sistema de Reinyección de Fluidos</i>	110
Plano 5.2: <i>Diagrama de Recolección de Fluidos y el Sistema de Reinyección</i>	111
Plano 5.3: <i>Diseño de la Planta Geotermoeléctrica</i>	112
Plano 5.4: <i>Diagrama Unifilar Subestación Laguna Colorada</i>	143

GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

1 MW	1.000.000 Watt
Ω	Ohmio
Ω *m	Ohmio por metro
$^{\circ}\text{C}$	Grado centígrado
$^{\circ}\text{C}/\text{m}$	Grado centígrado por metro
$^{\circ}\text{F}$	Grado Fahrenheit
AE	Autoridad de Fiscalización y Control Social de Electricidad.
Bar	Bares
BCB	Banco Central de Bolivia.
BEN	Balance Energético Nacional.
BID	Banco Interamericano de Desarrollo.
Bornes	Conexión eléctrica son los contactos que se utilizan para derivar la energía producida por una pila hacia dispositivos como baterías, motores o u otros aparatos eléctricos.
C.A.	Corriente Alterna
Caloportador	Fluido que transporta calor de un lugar a otro.
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CO ₂	Dióxido de carbono
EEIA-AI	Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental Analítico Integral
EEUU/USA	Estados Unidos
ENDE	Empresa Nacional de Electricidad
FCRS	Sistema de Control y Reinyección de Fluidos
GWh	Giga Watt Hora
GWh/año	GigaWatts hora por año
Ha	Hectárea
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Commision
in/pulg/“	Pulgada
INE	Instituto Nacional de Estadística.
JICA	Agencia de Cooperación Internacional del Japón.
Kg/h*m ³	Kilogramo por hora por metro cubico
Kg/m	Kilogramo por metro

Kg/s	Kilogramo por segundo
Kgf/m	Kilogramo fuerza por metro
Km/h	Kilometro por hora
kJ/kg°K	Kilojoule por Kilogramo por grado kelvin
kJ/kg°C	Kilojoule por kilogramo por grado centígrado
kVp/cm	Kilovoltio pico por centímetro
kW/h	Kilovatio por hora
KA	KiloAmper
kg	Kilogramo
KV	Kilovoltio
Kw	Kilovatio
LT AT	Línea de Transmisión de Alta Tensión
LT BT	Línea de Transmisión de Baja Tensión
LT MT	Línea de Transmisión de Media Tensión
m	metro
MASS	Medio Ambiente, Salud y Seguridad
MM Bs	Millones de bolivianos.
Mm/kV	Milímetro por Kilovoltio
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
MVA	Mega Volt Amper
MW	Megavatio
MWe	Megawatts Electric
m ²	metro cuadrado
m/s	metro por segundo
m ³ /s	metro cubico por segundo
m ³ /h	metro cubico por hora
m/s ²	metro por segundo al cuadrado
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
PHE	Plate Heat Exchangers (Intercambiadores de calor de placas).
PM10	Son partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen, dispersas en la atmósfera, y cuyo diámetro varía entre 2,5 y 10 μm .
PTS	Partículas Suspendidas Totales
Pza	Pieza

Rad/s	Radian por segundo
RPM	Revoluciones por minuto
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SHE	Spiral Heat Exchanger (Intercambiadores de calor en espiral).
SI	Sistema Internacional de unidades
SIN	Sistema Interconectado Nacional
Ton/Hora	Tonelada por hora
USD	Dólares Americanos
VAC	Voltaje Alterno
VDC	Voltaje Continuo
WEST JEC	West Japan Engineering Consultants
YPFB	Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos.
Energía renovable	Aquellas obtenidas de los recursos naturales y/o desechos, tanto industriales como urbanos.
Energías no renovables	Aquellas obtenidas a partir de combustibles fósiles (líquidos o sólidos) y sus derivados.
Generación hidroeléctrica	Producción de energía por medio del agua.
Generación termoeléctrica	Producción de energía por medio de combustibles fósiles.
Generación eólica	Producción de energía por medio del viento.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto de grado “***Diseño de la ingeniería conceptual para el sistema de producción de Energía Geotérmica y planta de energía Geotermoeléctrica en Sol de Mañana Potosí***”, propone el diseño del sistema de recolección del fluido geotérmico y diseño de una planta de energía eléctrica de 100 [MW] de potencia dividido en 4 unidades de 25 [MW] a partir de las fuentes geotérmicas, con el fin de bajar el consumo de Gas Natural y Diésel Oil de las plantas Termoeléctricas que funcionan actualmente en el país.

En el Capítulo I, realizamos una breve introducción y análisis histórico del proyecto, planteándonos objetivos y problemáticas que se van a aclarar durante el desarrollo de este. Por último, realizamos una justificación técnica, económica, social y ambiental de todo lo positivo que dejará un proyecto de esta magnitud.

En el Capítulo II, se detalla los conceptos básicos de energía geotérmica desde la fuente, tipos de yacimientos geotérmicos, también hacemos referencia a la descripción de las diferentes clases de centrales geotermoeléctrica las cuales se dividen de acuerdo con el tipo de fluido, temperatura y entalpia del reservorio geotérmico.

En el Capítulo III, repasamos conceptos básicos y fundamentales de termodinámica como Trabajo (W), Calor (Q), Entalpia (H) y Entropía (S) mismas que se utilizan en el diseño de la planta Geotermoeléctrica.

En el Capítulo IV, realizamos una recopilación de todos los informes realizados por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) para ENDE Corporación, donde se detallan las características técnicas de los pozos perforados en la zona Sol de Mañana y Cerro Apacheta (SM-1 ~ SM-5 y AP-1) como estudios geológicos y pruebas de producción que se realizaron a estos pozos.

En el Capítulo V, describimos la metodología de cálculo y diseño de nuestra Planta Geotermoeléctrica haciendo uso de las características fisicoquímicas del fluido geotérmico, sistema de recolección, sistema de reinyección y también de los equipos principales de la planta. Hacemos mención también a los trabajos previos que se deben realizar como obras civiles y arquitectura, línea de transmisión y la subestación eléctrica que también se debe construirá en el lugar.

Y finalmente en el Capítulo VI, de la ingeniería y diseño técnico del proyecto donde realizamos los cálculos numéricos de la potencia de la planta Geotermoeléctrica. Todo lo concerniente a la potencia energética de la planta está en función de la cantidad del flujo másico, entalpia y temperatura del fluido geotérmico.

Por ultimo y como método didáctico realizamos la simulación con el software THERMOFLEX 21.0 que es un simulador especial para el diseño de plantas de generación de energía eléctrica, que pueden ser de diversas fuentes, en nuestro caso pozos geotérmicos.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El proyecto analiza los datos de producción, temperatura, entalpía y flujo másico de los 6 pozos perforados en Sol de Mañana y Cerro Apacheta denominados SM-1 ~ SM-5 y AP-1 respectivamente, perforados entre los años 1987 y 1992 por Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB) en el departamento de Potosí, la información puntual de los parámetros fisicoquímicos registrados permitirá caracterizar cualitativa y cuantitativamente la energía del subsuelo para la toma de decisiones con el uso del recurso geotérmico.

Según los datos recaudados de los informes publicados por parte de la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) detallan que: la profundidad de los pozos varía desde los 1.178,5 a los 1.726,2 metros de profundidad; los iones disueltos son de SO_4 , HCO_3 y Cl ; la temperatura de estos pozos varía desde los 240 a 300 °C valor cambiante de pozo a pozo; la entalpía promedio fue de 1.050 [KJ/Kg]. Las Pruebas de producción fueron realizadas en 3 etapas: la primera fue entre los años 1987 – 1990, la segunda fue entre mayo – agosto de 1997 y la tercera fue en diciembre de 2012 hasta abril 2013. Cabe resaltar que ENDE hace el registro de la temperatura y caudal de estos pozos de manera permanente¹.

La empresa estatal ENDE tiene programado a futuro la perforación de 10 pozos de producción y 6 pozos de reinyección en la zona Sol de Mañana adicionales a los 6 pozos existentes, también el proyecto prevé la construcción de una central Geotermoeléctrica con una potencia de 100 [MW], esta capacidad se logrará con la instalación de cuatro unidades de 25 [MW]. Por último, la construcción de una línea de transmisión eléctrica de circuito simple de 230 [KV] con una longitud de aproximadamente 170 [km] entre la central geotérmica y la estación San Cristóbal².

Las centrales geotérmicas son las encargadas de convertir la energía geotérmica en electricidad. Estas instalaciones realizan un intercambio termodinámico a una determinada profundidad de las capas terrestres para calentar el fluido geotérmico. El calor se aprovecha para generar electricidad. Debido a que el calor en el interior de la Tierra es inagotable, se puede afirmar que esta forma de generación de electricidad es una fuente de energía renovable. Con el vapor generado se acciona una turbina de vapor conectada a un generador eléctrico de esta forma se genera la electricidad. Posteriormente, el fluido se enfría y es devuelto a la fuente de calor.

Será la primera vez que se construyan plantas de energía renovable de este tipo en Bolivia poniéndonos a la par de otros países que utilizan la energía del interior de la tierra, en este proyecto realizaremos el análisis de los parámetros de los pozos perforados con lo cual diseñaremos un sistema de producción, recolección y reinyección de vapor de los pozos geotérmicos y una planta Geotermoeléctrica ubicada en la zona de interés.

¹ ENDE (2015). *Asistencia especial para la implementación del proyecto (SAPI) para el proyecto de construcción de la planta Geotérmica Laguna Colorada.*

² UNASUR (2010). *Proyecto Geotérmico Laguna Colorada.*

1.2. ANTECEDENTES

El calor que emana del núcleo de la Tierra podría reemplazar un porcentaje sustancial de la energía producida actualmente por la combustión de gas, petróleo y carbón para la generación de electricidad. El calor de la tierra es un recurso inagotable cuya utilización prácticamente no genera emisiones de gas de efecto invernadero. Se trata, en resumen, de una solución casi perfecta para las necesidades energéticas del mundo. Pero para que el mundo pueda aprovechar este abundante recurso es preciso superar obstáculos económicos y tecnológicos de magnitud considerable³.

La utilización de los recursos geotérmicos para la generación de electricidad celebró su centenario el 2004. En 1904, en Larderello (Italia) el Príncipe Piero Ginori Conti ideó y realizó el primer experimento de generación eléctrica utilizando vapor geotérmico. Logró generar una pequeña cantidad de energía con una máquina de vapor a pistón de 0,4 [kW], suficiente para encender cinco bombillas, tanto fue el éxito obtenido que abrió el camino al desarrollo comercial de la geotermo-electricidad, que se concretizó en 1913 con la entrada en operación de la primera planta con una turbina de vapor de 250 [kW]. Treinta años después, en vísperas de la segunda guerra mundial, la industria geotermoeléctrica en Larderello se había exitosamente consolidado, alcanzando una capacidad instalada de 127 [MWe] en 1942⁴.

En América Latina, Chile fue pionera con la ejecución de estudios y perforaciones en la zona termal de El Tatio entre 1921 y 1923, con la colaboración de técnicos italianos. El objetivo era la generación de electricidad para las nacientes industrias mineras atacameñas y los estudios realizados en ese entonces llevaron a una estimación de capacidad de generación eléctrica de 50 [MW] (Tocchi, 1923). Sin embargo, el proyecto no prosperó.

Todos estos países Chile, Argentina, Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia y Venezuela han sido objeto de investigaciones geotérmicas, generalmente a partir de los años '70s, y cuentan con diferentes niveles de identificación del recurso. La *Tabla 1.1* resume los principales aspectos geotérmicos de los países andinos, indicando el año en el cual iniciaron las investigaciones geotérmicas para fines eléctricos, la cantidad de manifestaciones termales inventariadas, el número de áreas o prospectos geotérmicos conocidos, la cantidad de proyectos geotérmicos. A continuación, se reporta una síntesis de la situación en cada país⁴.

Según el “Plan de Expansión del Sistema Interconectado Nacional (SIN) 2010 – 2020”, elaborado por la Comisión Nacional de Despacho de Carga, señala que la demanda máxima del sistema en 2009 fue de 915 [MW] con una capacidad instalada total de 1.162 [MW]. En el país se espera un 7.0 % de crecimiento anual promedio en la demanda en el futuro próximo. Por lo tanto, el desarrollo de nuevas fuentes de energía es un tema por lo cual el país debe tomar acciones sin demora. Por otro lado, las actividades mineras en suroeste del país están impulsando el crecimiento de la demanda de electricidad en ese sector, a pesar de que esta región no cuenta con una fuente de energía a gran escala. Por esta razón, la región no cuenta con medios suficientes para suministrar electricidad en este sector del sistema nacional a través de una red de transmisión⁵.

³ Cordes y Hallinan (2010). *Aprovechamiento del calor de la tierra*.

⁴ Bona y Coviello (2016). *Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur*.

⁵ MHE (2014). *Plan eléctrico del estado plurinacional de Bolivia 2025*.

Tabla 1.1: Principales características geotérmicas de los Países Andinos.

País	Inicio Investigaciones Geotérmica	Cantidad Manifestaciones Termale	Áreas Geotérmicas Identificadas	Proyectos Geotermo eléctrica	Potencial Estimado (MW)
Argentina	1971	450	~40	5	490-2010
Estado Plurinacional De Bolivia	1975	~70	~20	3	510-2490
Chile	(1921) - 1968	>300	20 - 25	11	1000-2950
Colombia	1968	~300	15	4	700-2210
Ecuador	1979	167	24	3	500-1700
Perú	1975	>500	61	11	2860
República Bolivariana de Venezuela	1974	~70	>30	1	370-910

Fuente: Bona y Coviello (2016).

El suministro actual de energía presenta pérdidas en la línea de transmisión, y al mismo tiempo, el abastecimiento de energía es inestable por no haber una fuente alternativa y/o una línea de transmisión alternativa. Por otro lado, considerando la altitud de esta región, la construcción de Plantas Termoeléctricas no es adecuada y tampoco existen las fuentes hidráulicas adecuadas en esta zona. Ante esta situación, se ha realizado la perforación de seis pozos geotérmicos a partir de la segunda mitad de los años 80's, hasta la primera mitad de los años 90's y se ha confirmado la existencia de temperaturas de más de 250 °C. El proyecto geotérmico de Laguna Colorada de un potencial geotérmico estimado de 100 [MW], se considera como un proyecto prioritario no solamente para esta región sino para todo el sector eléctrico del país.

En respuesta a esta solicitud, la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) decidió llevar a cabo el estudio preparatorio para el desarrollo geotérmico de Laguna Colorada, con base en una revisión del estudio de factibilidad anterior y un estudio de impacto ambiental, lo anterior para preparar el proyecto relacionado con la construcción de la planta geotérmica en Sol de Mañana, el cual sería financiado con recursos de préstamo y propios.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Identificación del problema

Actualmente Bolivia no cuenta con nuevos descubrimientos de campos gasíferos a esto añadimos la demanda interna y los contratos de compra – venta de Gas Natural al Brasil y a la Argentina cuyos requerimientos van creciendo con el pasar del tiempo. Todo o mencionado anteriormente contribuye a la generación de un déficit para las plantas termoeléctricas que utilizan este combustible para la generación de electricidad.

Por tanto, es imperioso el cambio de la matriz energética eléctrica por energías alternativas y renovables que puedan cubrir la demanda interna de electricidad y también exportar a países de la región. Y de esta manera continuar con la consolidación de políticas energéticas, convirtiendo a Bolivia en el corazón energético de Sudamérica.

Una opción es la utilización de la energía Geotérmica para la generación de electricidad, afortunadamente Bolivia cuenta con este tipo de energías que no son explotados por falta de conocimiento y de inversiones en esta área.

Viendo como una alternativa factible y muy rentable la energía Geotérmica tendrá que ser una de las nuevas fuentes para la generación de electricidad en Bolivia.

1.3.2. Formulación del problema

Con todo lo mencionado anteriormente y de acuerdo con la información recopilada sobre el manejo y construcción de plantas Geotérmicas de energías renovables en otros países llegamos a la gran pregunta. ¿Será factible cambiar la matriz energética de Bolivia usando energías geotérmicas? y ¿Será la utilización de energía Geotérmica una solución al creciente requerimiento de energía eléctrica en Bolivia?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

- Diseñar la ingeniería conceptual para el Sistema de producción de energía geotérmica y planta de energía Geotermoeléctrica en Sol de Mañana Potosí.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Describir la metodología y conceptos referentes a las actividades de producción e industrialización de la energía Geotérmica.
- Realizar un diagnóstico de la dinámica energética y factibilidad para el desarrollo de la energía Geotérmica en Bolivia.
- Desarrollar un diseño técnico de la ingeniería conceptual y básica de la producción del fluido geotérmico y planta Geotermoeléctrica con la descripción a detalle de cálculos para su dimensionamiento.
- Realizar una evaluación económica - financiera para evaluar la viabilidad del proyecto.

1.5. JUSTIFICACIÓN

1.5.1. Justificación Técnica

Con la propuesta de ingeniería básica del proyecto se conocerá la metodología de producción y diseño de una planta geotérmica desarrollada en el occidente boliviano.

Los pozos geotérmicos profundos tienen como objetivo la explotación de un recurso geotérmico, siendo el uso principal la generación de energía eléctrica. La tecnología actual permite la explotación de recursos geotérmicos a relativa profundidad para bombear agua caliente o vapor, ya que a profundidades mayores no es económicamente viable, sobre todo después del agotamiento del líquido (agua/vapor).

1.5.2. Justificación Económica

La concesión del campo geotérmico Sol de Mañana se tiene como objetivo principal la construcción de una planta Geotermoeléctrica de 100 [MW], esta planta ayudará a la producción de electricidad en el occidente del país, dejando de lado la dependencia del Gas Natural y Diesel Oil en las plantas Termoeléctricas.

Debido a la alta rentabilidad de este tipo de energías podremos aminorar los costos de energía eléctrica actuales, ayudando directamente al bolsillo de la población. También se realizará la generación de empleos y reactivación económica de esta provincia tan alejada y muy olvidada por el gobierno.

1.5.3. Justificación Social

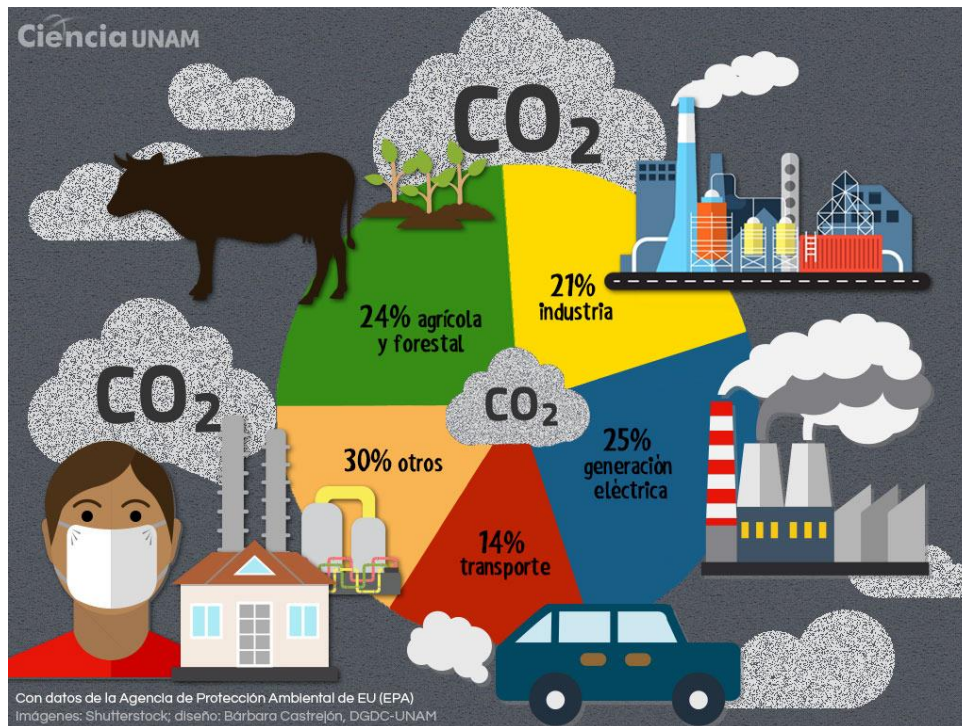
A través del proyecto, se prevé incrementar la generación de electricidad para apoyar la demanda nacional y metas de exportación de electricidad, diversificando la matriz energética y contribuyendo a la mitigación del impacto que tienen los combustibles fósiles con el cambio climático.

1.5.4. Justificación Ambiental

La producción y el consumo de energía de fuentes fósiles son los responsables de la emisión de una gran parte de gases de efecto invernadero a nivel global.

En la actualidad la disminución de las emisiones de CO₂, es uno de los grandes objetivos y retos de los distintos gobiernos del mundo. La Geotermia generaría electricidad que permitirá en gran medida la reducción de las emisiones de CO₂, al no quemar combustibles fósiles y además cabe la posibilidad de convertir con el tiempo los pozos geotérmicos en almacenes de CO₂.

Figura 1.1: Generación de CO₂ en la sociedad.



Fuente: UNAM-DGDC (2020).

1.6. ALCANCE

1.6.1. Alcance Temático

El alcance temático del proyecto consiste en el diseño del Sistema de Reinyección del Colector de Fluidos (FCRS por sus siglas en inglés) y cálculos de dimensionamiento de una planta Geotermoeléctrica de 4 unidades de 25 [MW] para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes geotérmicas. Las etapas técnicas que incluyen el programa de Pozos Geotérmicos son:

- Descripción general para el proyecto Sistema de Reinyección del Colector de Fluidos de pozos Geotérmicos en base a parámetros técnico - económicos.
- Descripción y evaluación de un programa de producción de acuerdo con las características técnicas del reservorio y a los requerimientos de energía para la planta Geotérmica.
- Desarrollo y clasificación de diferentes tipos de plantas Geotérmicas renovables y amigables con el medio ambiente.
- Descripción de una planta Geotermoeléctrica: equipos, maquinaria y el proceso termodinámico para a transformación de vapores saturados a energía eléctrica.

1.6.2. Alcance Geográfico

El presente proyecto será enfocado en el área del campo Geotérmico Sol de Mañana que está ubicado en la región suroeste del Estado Plurinacional de Bolivia, en el Departamento de Potosí, Provincia Sur Lípez, Municipio de San Pablo de Lípez, en el área fumarólica del Campo Geotérmico Sol de Mañana, bajo las coordenadas referenciales UTMWGS84 X: 629577,24 Y: 7518040,45 Zonas 19K. A una altitud entre 4.900 y 4.980 m.s.n.m. como se muestra en la *Figura 1.2*. El proyecto está ubicado a unos 36 km al sur de la Laguna Colorada dentro de la Reserva Natural de Fauna Andina Eduardo Avaroa.

Figura 1.2: Ubicación del Campo Sol de Mañana y vías de acceso.



Fuente: Verduguez y Mamani (2017).

1.6.3. Alcance Legal

Actualmente no existe una norma específica sobre la exploración, producción y utilización de energías Geotérmicas.

Podemos basarnos a las normas de exploración, perforación y producción de pozos Hidrocarburíferos y a todos los diferentes reglamentos que tengan como fin la explotación de recursos naturales. De la misma forma para las normativas medioambientales.

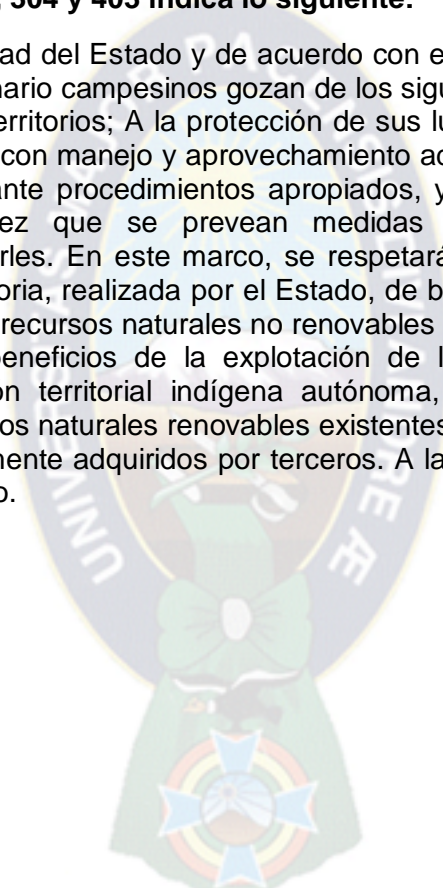
Constitución Política del estado en el:

Artículo 378, párrafo 2 indica lo siguiente:

Las diferentes formas de energía y sus fuentes constituyen un recurso estratégico, su acceso es un derecho fundamental y esencial para el desarrollo integral y social del país, y se regirá por los principios de eficiencia, continuidad, adaptabilidad y preservación del medio ambiente. Es facultad privativa del Estado el desarrollo de la cadena productiva energética en las etapas de generación, transporte y distribución, a través de empresas públicas, mixtas, instituciones sin fines de lucro, cooperativas, empresas privadas, y empresas comunitarias y sociales, con participación y control social.

Artículo 30, párrafo 2, 304 y 403 indica lo siguiente:

En el marco de la unidad del Estado y de acuerdo con esta Constitución las naciones y pueblos indígena originario campesinos gozan de los siguientes derechos: A la titulación colectiva de tierras y territorios; A la protección de sus lugares sagrados.; A vivir en un medio ambiente sano, con manejo y aprovechamiento adecuado de los ecosistemas.; A ser consultados mediante procedimientos apropiados, y en particular a través de sus instituciones, cada vez que se prevean medidas legislativas o administrativas susceptibles de afectarles. En este marco, se respetará y garantizará el derecho a la consulta previa obligatoria, realizada por el Estado, de buena fe y concertada, respecto a la explotación de los recursos naturales no renovables en el territorio que habitan. A la participación en los beneficios de la explotación de los recursos naturales en sus territorios. A la gestión territorial indígena autónoma, y al uso y aprovechamiento exclusivo de los recursos naturales renovables existentes en su territorio sin perjuicio de los derechos legítimamente adquiridos por terceros. A la participación en los órganos e instituciones del Estado.



CAPÍTULO II

MARCO TEORICO Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1. INTRODUCCIÓN

La Geotermia, es la disciplina científica que comprende el estudio de las variaciones de temperatura dentro de la corteza y los fenómenos naturales que influyen sobre la distribución de los flujos térmicos. Los progresos alcanzados en las últimas décadas, así como la puesta en marcha de proyectos ambiciosos y efectivos en muchas partes del mundo, hacen que los estudios geotérmicos representen un camino fértil para la búsqueda y hallazgo de nuevas fuentes de energía.

En el presente capítulo se describen los fundamentos básicos en que se apoyan los estudios geotérmicos, se incluye una aproximación al conocimiento de la dinámica litosférica y se brinda una amplia referencia a las aplicaciones de la energía geotérmica.

2.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES EN GENERACIÓN GEOTÉRMICA

2.2.1. CONCEPTOS DE GEOTERMIA

Geotermia es una palabra de origen griego, deriva de “GEOS” que quiere decir tierra y “THERMOS” que significa calor; el calor de la tierra. Se empleo indistintamente tanto a la ciencia que estudia fenómenos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales que intentan explotar ese calor para producir energía eléctrica y/o calor útil de forma directa para el ser humano.

2.2.2. ENERGÍA GEOTERMIA

Por definición, la energía geotérmica es aquella que proviene del calor existente en el interior de la Tierra; como sabemos, este calor fluye desde el centro del planeta hasta el exterior manifestándose en superficie mediante fumarolas, geiseres o las fuentes termales y es recuperada mediante sistemas de utilización y transformación a fuentes de energía aprovechables.

2.2.3. CALOR⁶

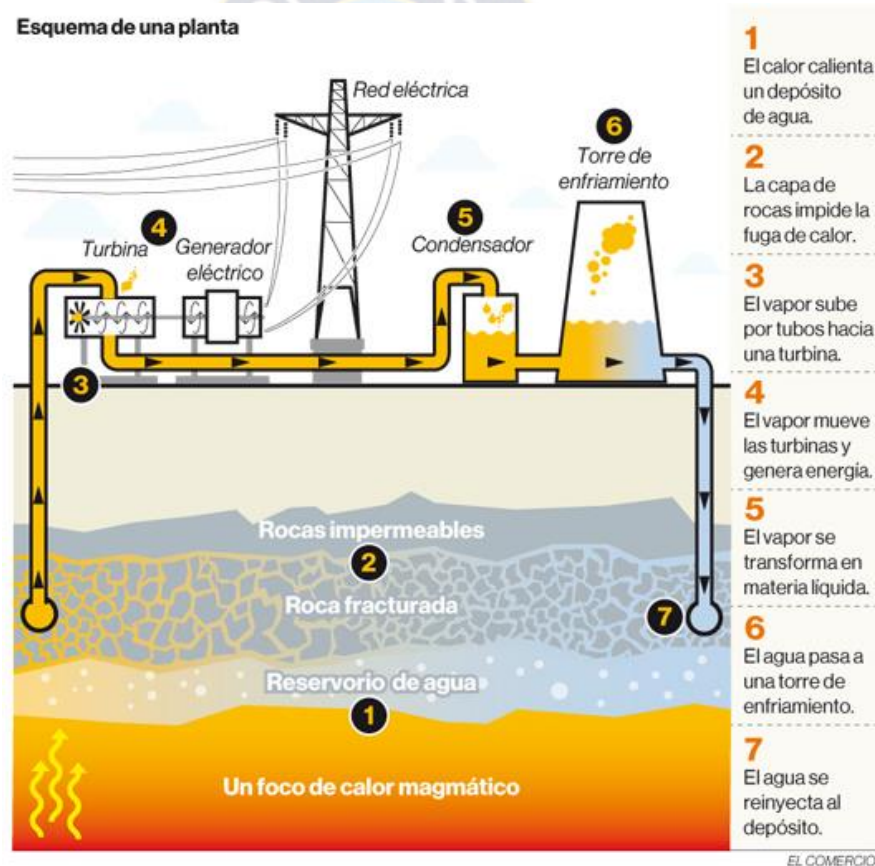
El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la Tierra que genera fenómenos geológicos a escala planetaria; el término energía geotérmica es a menudo utilizado para indicar aquella porción del calor de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre; en este sentido utilizaremos dicho término.

⁶ Córdova (2007). *Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW*

Es un recurso:

- Sostenible ya que ofrece un flujo constante de producción energética sin dependencia de variaciones estacionales como ocurre con gran parte de las energías renovables.
- Renovable porque el calor que emana de la tierra es esencialmente ilimitado.
- Limpio debido a que los impactos medioambientales son destacablemente menores.
- Abundante porque el calor está disponible en todas partes y con una gran variedad de aplicaciones entre ellas la generación de electricidad.

Figura 2.1: Uso y procesamiento de la energía geotérmica.



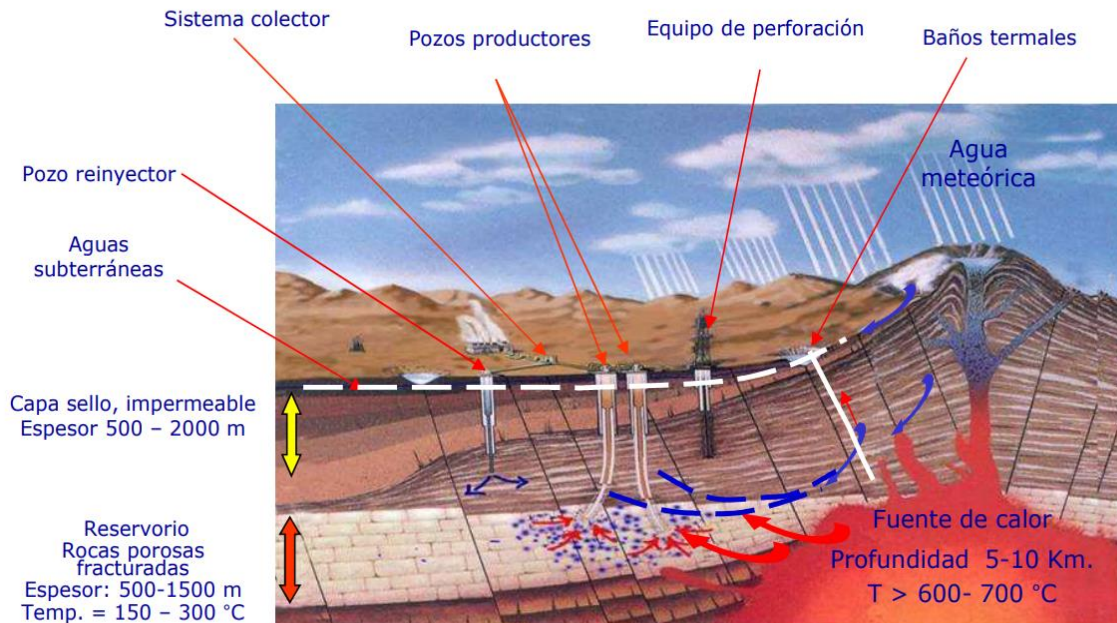
Fuente: *El Comercio* (2010).

2.2.4. SISTEMAS GEOTÉRMICOS

Los sistemas geotérmicos existentes en la Tierra se clasifican, en forma general, con base en la temperatura del fluido endógeno que se extrae, o del fluido que se inyecta para la extracción de calor de la roca.

Cuando la temperatura del fluido es mayor de 200 °C, se le considera un recurso de alta entalpía (o alto contenido energético), ideal para la producción de electricidad con sistemas convencionales de generación. Si las temperaturas del fluido están en el intervalo de 100 a 200 °C, o bien son menores de 100 °C, se les denomina sistema de mediana o baja entalpía, respectivamente.

Figura 2.2: Estructura de la energía geotérmica terrestre.

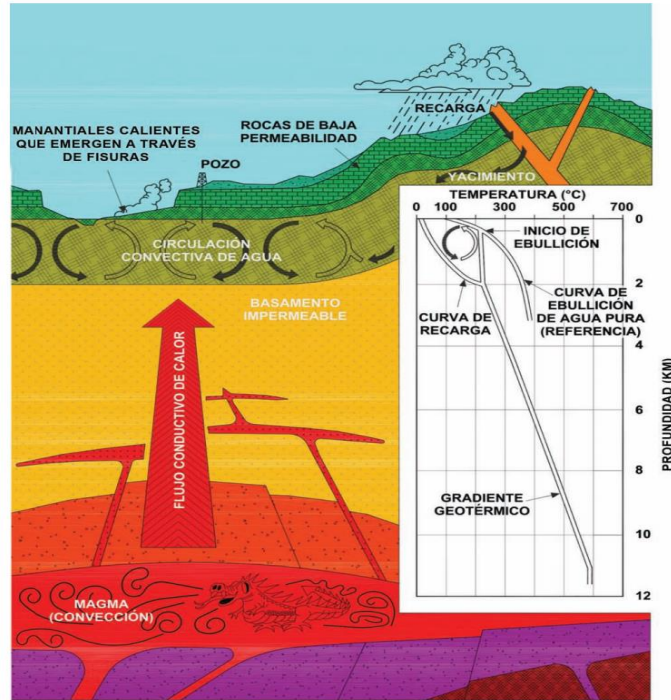


Fuente: *Aquiaysen (2015)*.

Entre los sistemas geotérmicos más conocidos se tienen a los siguientes:

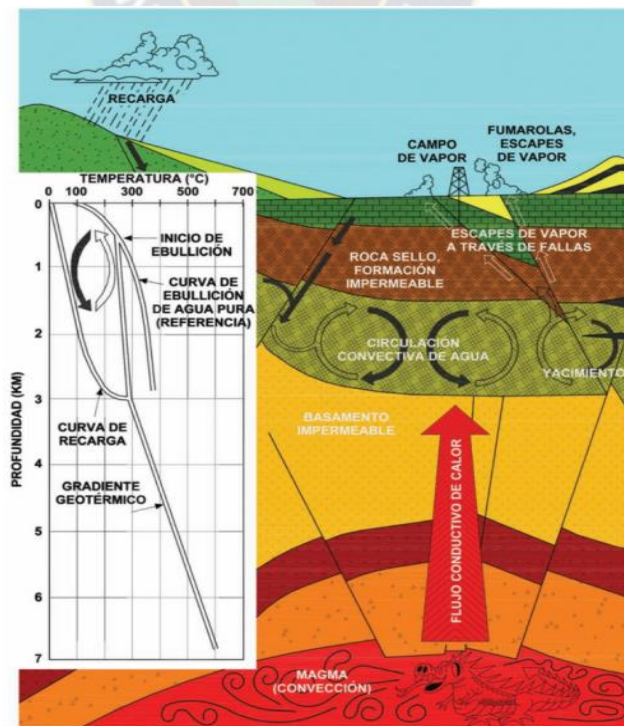
- a) **Sistemas hidrotermales convectivos:** Están constituidos por una fuente de calor, fluidos que constituyen al medio de transporte del calor, roca permeable donde se almacenan los fluidos y una capa de "roca sello". Los fluidos se infiltran en la corteza terrestre a través de poros y fracturas hasta alcanzar un yacimiento, donde se almacenan por largo tiempo. La existencia de estos yacimientos se manifiesta en la superficie por la presencia de manantiales calientes, fumarolas, géisers, lagunas de lodo hirviente o suelos calientes. Estos yacimientos pueden ser de vapor o líquido dominante de alta temperatura, o de líquido de mediana o baja temperatura (*Figuras 2.3 y 2.4*). Para la generación de electricidad, se extraen fluidos bifásicos (líquido y vapor) de alta temperatura (a más de 200 °C) mediante pozos perforados, y se transportan a la superficie para una separación eficiente.

Figura 2.3: Yacimiento geotérmico de alta temperatura.



Fuente: Santoyo y Barragán (2010).

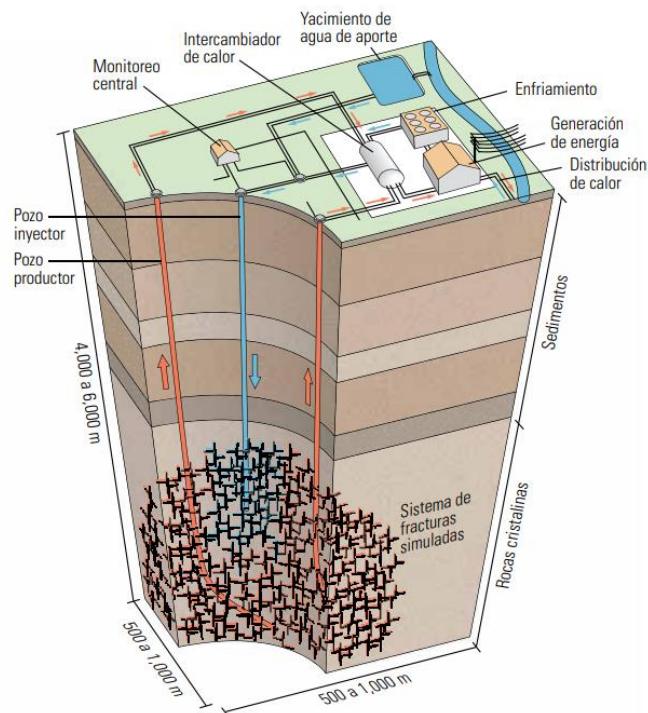
Figura 2.4: Yacimiento geotérmico de baja temperatura.



Fuente: Santoyo y Barragán (2010).

- b) **Sistemas geotérmicos de roca seca caliente o “sistemas geotérmicos mejorados”**: Consisten en roca seca a muy alta temperatura (alrededor de 650 °C) localizada entre 2 y 4 kilómetros de profundidad, y con la característica particular de no contar con fluidos suficientes en el fondo para transportar el calor hacia la superficie. Su explotación requiere de la creación de una red de fracturas en la roca y la inyección de fluidos para su aprovechamiento. Por su inmenso potencial y su distribución prácticamente uniforme en toda la superficie terrestre, se estima que para el 2050 podrían obtenerse alrededor de 100 mil megawatts (millones de watts, unidad en que se mide la potencia según el Massachusetts Institute of Technology, 2006). Esta promisoría tecnología se encuentra ya en fase de investigación y desarrollo con avances muy importantes; destaca el proyecto demostrativo de Soultz-sous-Forêts, en Francia, con una planta piloto de 1.5 megawatts.

Figura 2.5: *Sistemas Geotérmicos Estimulados.*



Fuente: *García (2015).*

- c) **Sistemas geotérmicos geopresurizados**: en los que el agua contenida en el acuífero está sometida a grandes presiones (entre un 40% y un 90% superiores a la presión hidrostática que correspondería a la profundidad que se halla) y se encuentra casi completamente sellada para el intercambio con las rocas circundantes. Además de la energía térmica del agua geotermal, los sistemas geopresurizados también contienen energía mecánica como consecuencia del exceso de presión del fluido, así como cierto potencial de energía de combustión, ya que, normalmente, se encuentran cantidades importantes de metano (gas natural) disueltas en el agua geotermal.

La mayor parte de la energía térmica de los yacimientos geopresurizados es resultado de la contribución, aproximadamente a partes iguales, de la temperatura del agua y del metano disuelto. Los yacimientos geopresurizados se forman generalmente en cuencas sedimentarias más que en áreas volcánicas. De hecho, se han descubierto como consecuencia de exploraciones petrolíferas en cuencas sedimentarias con gradiente geotérmico normal, pero en las que el agua se encuentra a una profundidad de 6.000 metros o mayor y, por tanto, a temperaturas superiores a 150 °C.

- d) **Sistemas geotérmicos marinos:** Se localizan en el fondo del mar, y se manifiestan como descargas, fumarolas o chimeneas hidrotermales. Se han identificado en el golfo de California en México, con temperaturas hasta de 350 °C, y por el momento no se explotan comercialmente.
- e) **Sistemas geotérmicos magmáticos:** Consisten en rocas fundidas (a unos 800 °C) y están asociados con aparatos volcánicos activos. Para extraer el calor de estos sistemas se han desarrollado algunos proyectos piloto en Hawaii e Islandia, pero su explotación comercial requiere la búsqueda de materiales adecuados que resistan la corrosión y las altas temperaturas.
- f) **Sistemas geotérmicos supercríticos:** Se ubican a grandes profundidades (entre 5 y 6 kilómetros) y contienen fluidos en estado supercrítico (es decir: a presión y temperatura tal, que adopta un estado intermedio entre líquido y gas) con temperaturas de hasta 600 °C; se han detectado cerca de Islandia, donde actualmente se investiga la factibilidad de su explotación (Iceland Deep Drilling Project, 2010). Este tipo de sistemas supercríticos pueden proveer hasta diez veces más energía que los sistemas geotérmicos convencionales, por lo que, de ser factible su explotación, la capacidad geotérmica podría incrementarse en varios órdenes de magnitud.

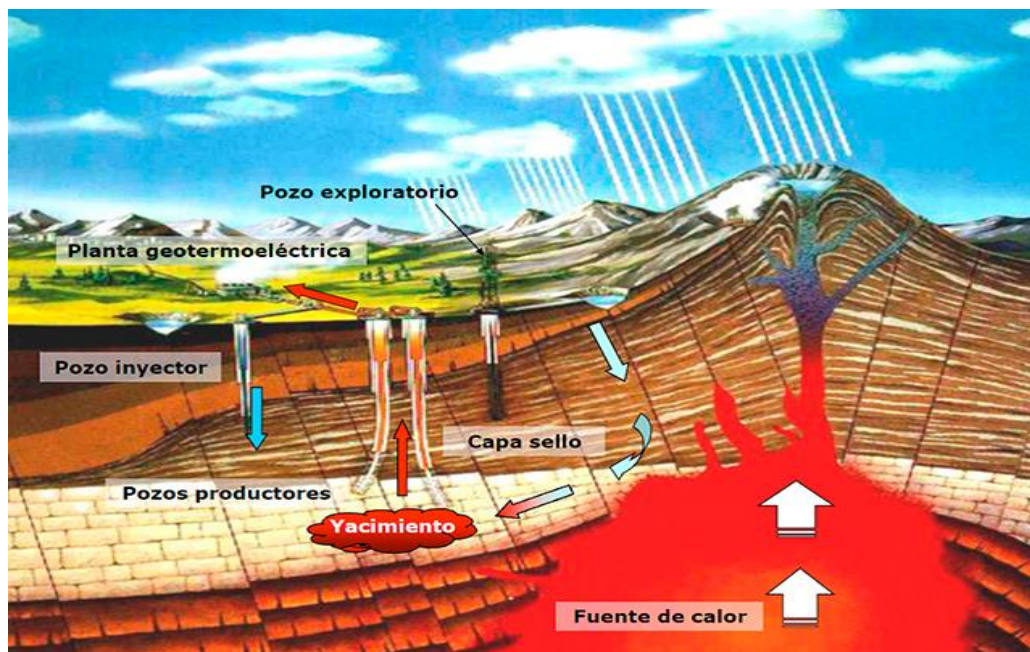
2.2.5. YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS⁷

Se denomina así a los espacios físicos en el interior de la corteza terrestre con determinadas condiciones geológicas, en el que se sitúa un recurso geotérmico cuya explotación es económicamente viable.

Los yacimientos geotérmicos pueden clasificarse según diferentes criterios: contexto geológico, nivel de temperatura, modo de explotación y tipo de utilización. Lo habitual es clasificarlos en función del nivel térmico de los fluidos que contienen, es decir, de los recursos que albergan, adoptándose los mismos intervalos de temperatura considerados para éstos:

⁷ Sánchez y Sanz (2020). *Evaluación del potencial de Energía Geotérmica*.

Figura 2.6: Esquema yacimiento geotérmico.



Fuente: EADIC (2017).

- **Yacimientos de alta entalpía**, Zonas con gradientes geotérmicos elevados, a profundidades entre 1,5 y 3 km. Presentan temperaturas superiores a 150 °C y están constituidos por vapor seco (muy pocos casos) o por una mezcla de vapor y líquido. Son utilizados generalmente para la producción de electricidad.
- **Yacimientos de media entalpía**, Zonas con gradientes geotérmicos elevados, a profundidades inferiores a los 2 km, con temperaturas de entre 100 y 150 °C. Son utilizados para producción de electricidad (empleando sistemas de ciclo binario) y para climatización en sistemas urbanos y procesos industriales.
- **Yacimientos de baja entalpía**, Zonas con un gradiente geotérmico normal, a profundidades de entre 1,5 y 2 km, con temperaturas de entre 30 y 100 °C. Dependiendo de la temperatura tienen distintas aplicaciones en procesos de uso directo del calor.
- **Yacimientos de muy baja entalpía**. También denominada geotermia somera, a profundidades menores de 200 m y temperaturas inferiores a 30 °C. Se utiliza principalmente para calefacción y refrigeración de viviendas o procesos de menor temperatura (generalmente empleando tecnología de bomba de calor).

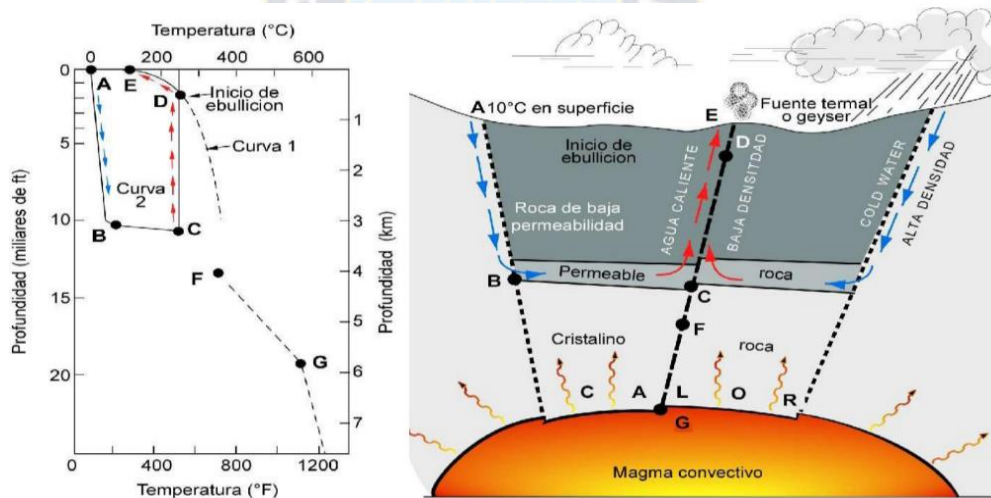
2.2.5.1. Fuente de calor

La fuente de calor se relaciona con la presencia de una intrusión magmática dentro de la corteza terrestre, con una temperatura que varía de 600 °C a 1.000 °C, frecuentemente a profundidades del orden de 5 a 10 km.

Esto se basa en el hecho notable que todos los campos geotérmicos "comerciales" están ubicados en regiones donde ha ocurrido actividad volcánica o está actualmente ocurriendo. Algunos campos están actualmente situados en o cerca de volcanes mientras otros no están directamente relacionados con centros de actividad volcánica reciente.

En un volcán activo, una intrusión magmática puede alcanzar la superficie a través de un gran sistema de fallas. Un fallamiento presente en rocas duras y compactas puede proporcionar un canal para el ascenso del magma, mientras que rocas plásticas como la arcilla puede fluir por gravedad dentro del espacio de la falla, sellándola desde arriba. En este caso la energía de una intrusión magmática puede ser suficiente para penetrar el sistema de fallas, pero insuficiente para superar la cobertura de rocas plásticas, llegando al límite entre las rocas plásticas y las densas.

Figura 2.7: Modelo de un sistema geotérmico.



La curva 1 es la curva de referencia para el punto de ebullición del agua pura. La curva 2 muestra el perfil de temperatura a lo largo de una típica ruta de circulación desde la recarga en el punto A hasta la descarga en el punto E.

Fuente: White (1973).

2.2.6. RECURSO GEOTÉRMICO Y RECURSO HIDROTÉRMAL

Hay autores que diferencian entre los recursos geotérmicos y los recursos hidrotermales. Algunos de ellos incluso no consideran como recurso geotérmico aquel en el que exista el conocido fluido geotérmico o geotermal, y sólo consideran como geotérmico el yacimiento de roca caliente seca sin ningún fluido caloportador.

La realidad es que existe una línea tan fina entre la consideración de recurso geotérmico e hidrotermal, que en este apartado se explicará la diferencia entre ambos, teniendo en cuenta que en este proyecto se ha considerado un recurso hidrotermal con un fluido geotérmico caliente, como recurso geotérmico.

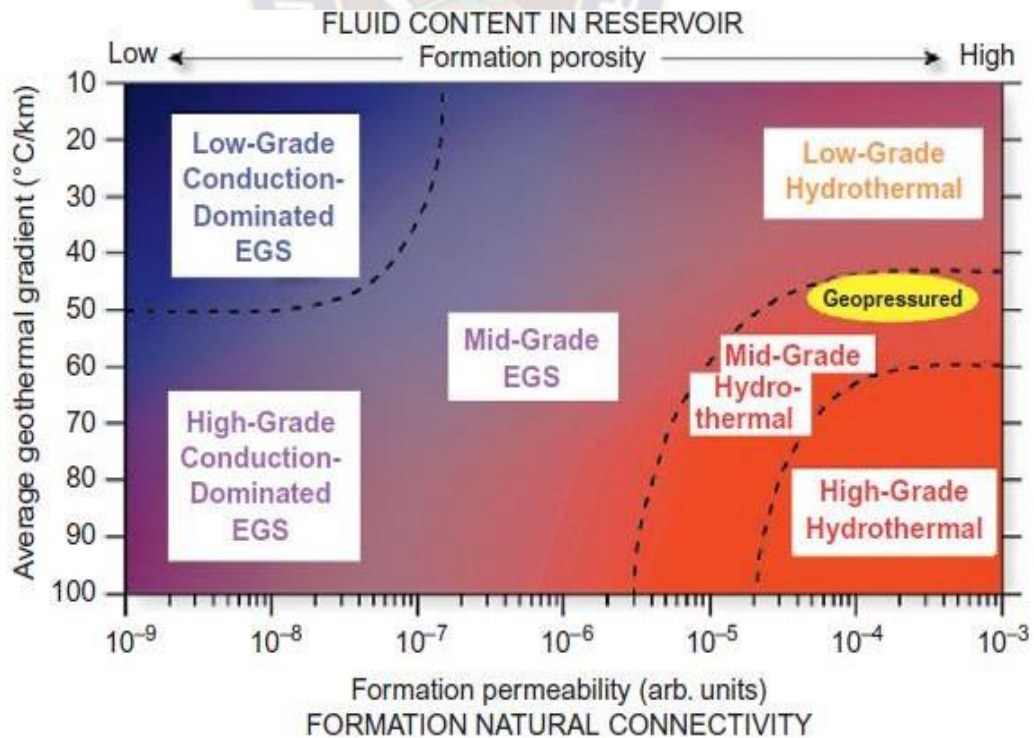
Una forma útil de diferenciar entre recursos puramente geotérmicos (roca caliente seca) e hidrotermales, es mediante el examen de la relación entre el gradiente de temperatura geotérmica y la permeabilidad de la formación natural.

Por lo tanto, observando la *Figura 2.8*, se puede ver que, si la formación es altamente permeable, y a la vez tiene un gradiente geotérmico bajo (esquina superior derecha), tenemos el potencial para un sistema hidrotermal de bajo grado, pero esto requerirá de pozos muy profundos para lograr temperaturas adecuadas para la generación de energía. Este sistema es comúnmente denominado como DHS (sistema hidrotermal profundo).

En la esquina diagonalmente opuesta, encontramos muy poca permeabilidad (falta de fracturas naturales) pero un gradiente de temperatura muy alto. Por lo tanto, podría ser posible el aprovechamiento con pozos relativamente poco profundos aplicando la técnica de fractura hidráulica conocida como “hidrofracking”. Este es el sistema clásico de EGS.

La esquina inferior derecha (gradiente de temperatura y permeabilidad altos), es la región en la que nos movemos normalmente para aprovechar el recurso hidrotermal con el objetivo de producir energía eléctrica o aprovechamiento de calor.

Figura 2.8: Diagrama Permeabilidad – Gradiente geotérmico.



Fuente: DiPippo (2015).

2.2.7. TIPOS DE RECURSO

Los recursos geotérmicos naturales pueden dividirse en cuatro categorías:

- **Vapor seco**, donde el fluido está completamente en fase gaseosa (muy raros).
- **Dominado por vapor**, donde el fluido geotérmico se encuentra en mayor proporción en estado gaseoso.
- **Dominado por agua**, donde el fluido geotérmico se encuentra en mayor proporción en estado líquido.
- **Agua de temperatura moderada** (menos de 150°C).

Además, los siguientes son recursos en etapa experimental:

- Agua presurizada, donde el fluido geotérmico está sometido a grandes presiones (entre un 40% y un 90% superiores a la presión hidrostática que correspondería a la profundidad a la que se halla).
- Sistemas geotérmicos estimulados (EGS), donde el agua debe ser bombeada hacia las fisuras y cavidades de las rocas calientes.

2.2.8. FLUIDO GEOTÉRMICO

Constituye el agua contenida en el yacimiento, es de origen meteórico o superficial, aunque parte de ella puede ser magmática es decir vapor de agua producido por la evolución del magma. La recarga de agua debe tener la posibilidad de infiltrarse en el subsuelo, mantener el balance hidrológico y alcanzar la profundidad necesaria para ser calentada. Este fluido estará en fase líquida o vapor y a menudo contendrá sustancias químicas disueltas y gases tales como CO₂, H₂S, etc.

Las características del fluido geotérmico, incluidas la química, la temperatura y el contenido de gases no condensables, pueden influir en el diseño del sistema de aprovechamiento en especial de las centrales eléctricas.

Figura 2.9: *Fumarolas de Laguna Colorada.*



Fuente: *Telma (2017).*

2.2.9. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Calor por conducción. Es un mecanismo de transferencia de calor propio de los medios sólidos.

Calor por convección. Es un mecanismo de transferencia de calor propio de los medios fluidos.

Calor por radiación. Es un mecanismo de transferencia de calor que no depende del medio.

Figura 2.10: *Mecanismos de transferencia de calor.*



Fuente: Méndez (2010).

2.2.10. INERCIA TÉRMICA

Se denomina inercia térmica a la energía almacenada en las rocas calientes que transfieren calor a los fluidos geotérmicos, es vital mantener una inercia térmica estable para la transmisión de calor a los fluidos.

2.2.11. GRADIENTE GEOTÉRMICO⁸

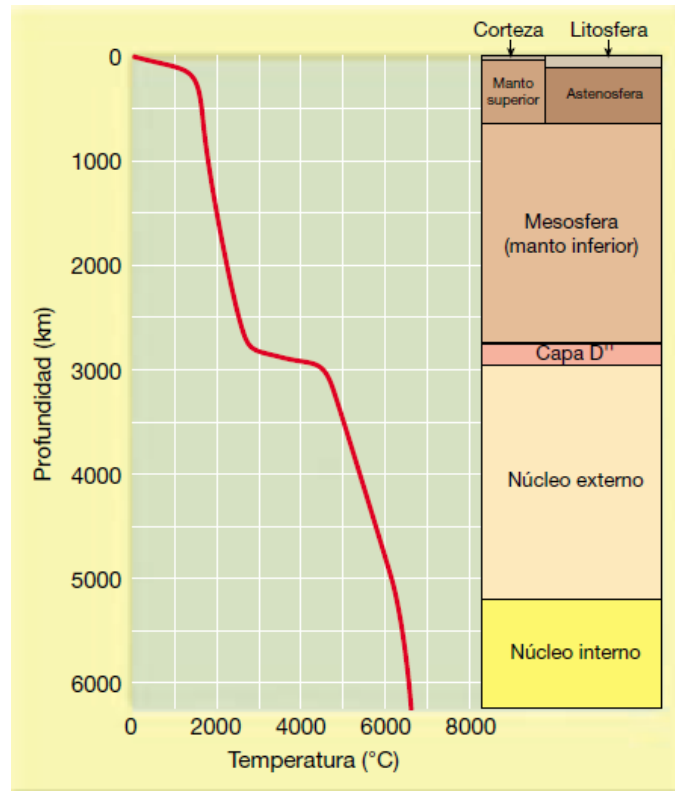
El gradiente geotérmico (G), es el incremento de la temperatura en relación directa al aumento de la profundidad del suelo. El gradiente geotérmico observado en la mayor parte del planeta es normalmente de 2,5 a 3°C por cada 100 metros.

En áreas geológicamente activas, el valor del gradiente geotérmico puede ser muy superior a los 3°C/100m, este fenómeno también se presenta en un sistema de fallas profundas, o debido a la existencia de acuíferos que pueden transportar el calor en sentido vertical. A este gradiente se lo denomina anómalo y surge en lugares idóneos para la extracción de calor con fines de generación de electricidad. El gradiente geotérmico también depende de las características físicas que presente el material en

⁸ Sánchez y Sanz (2020). *Evaluación del potencial de Energía Geotérmica.*

cada punto del interior del planeta (condiciones geológicas locales) como son: la relación presión con temperatura, composición química, presencia de movimientos conectivos y rozamientos, etc.

Figura 2.11: *Gradiente geotérmico terrestre.*



Fuente: Méndez (2010).

2.2.12. FLUJO DE CALOR

La energía geotérmica se evalúa en forma de calor hacia el exterior de la tierra, lentamente, debido a la baja conductividad térmica de los materiales que componen la corteza terrestre.

Se calcula como el producto del gradiente geotérmico por la conductividad térmica de las rocas, se lo mide perpendicularmente a la superficie de la tierra y representa la cantidad de calor geotérmico que se desprende por unidad de superficie.

$$Q = -K * \frac{dT}{dz} = K * G \dots\dots Ec. (2.1)$$

Dónde:

K : Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m} * ^\circ C\right]$

G : Gradiente geotérmico $\left[\frac{^\circ C}{m}\right]$

Q : Flujo de calor $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

El flujo de calor promedio que se encuentra en la tierra es alrededor de $87[\text{mW}/\text{m}^2]$ de los cuales corresponden a $60[\text{mW}/\text{m}^2]$ en los continentes y $101[\text{mW}/\text{m}^2]$ en los océanos, (existirán zonas donde este valor será superior). El objetivo del cálculo de flujo de calor es reconocer las zonas de mayor anomalía térmica, obteniéndose un potencial geotérmico aprovechable.

2.3. GENERACIÓN ELÉCTRICA

Desarrollar electricidad es la forma de utilización más importante a partir de recursos geotérmicos de alta temperatura ($> 150^\circ\text{C}$), mediante un ciclo similar a las centrales termoeléctricas convencionales. Los pozos perforados en un reservorio geotérmico transportarán el fluido de forma concentrada a la superficie, donde esta energía térmica será convertida en electricidad en una central de energía geotérmica.

2.4. TIPOS DE CENTRALES DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA⁹

La utilización de recursos geotérmicos como fuente de energía primaria para la generación de electricidad básicamente depende de las características y condiciones naturales del yacimiento geotérmico, de esta forma para determinar los diversos tipos de centrales se toma como referencia tanto presión como temperatura presente en los mismos. Se puede encontrar 5 prototipos de centrales para generar energía eléctrica en operación comercial y que se desarrollaran a continuación:

2.4.1. PLANTAS DE VAPOR HÚMEDO (FLASH)

Las plantas de vapor húmedo o plantas Flash son las más apropiadas para el aprovechamiento del recurso geotérmico de alta entalpía más común, el cual consiste en una mezcla bifásica de líquido y vapor. Debido a esto, el fluido que llega a la superficie debe ser llevado a un separador que separa ambas fases. El vapor resultante se enviará a una turbina para producir electricidad.

Cabe destacar que la fracción líquida puede ser empleada para aprovechamiento directo del calor, como agricultura o procesos de calor industrial.

2.4.1.1. Planta geotérmica tipo Single Flash

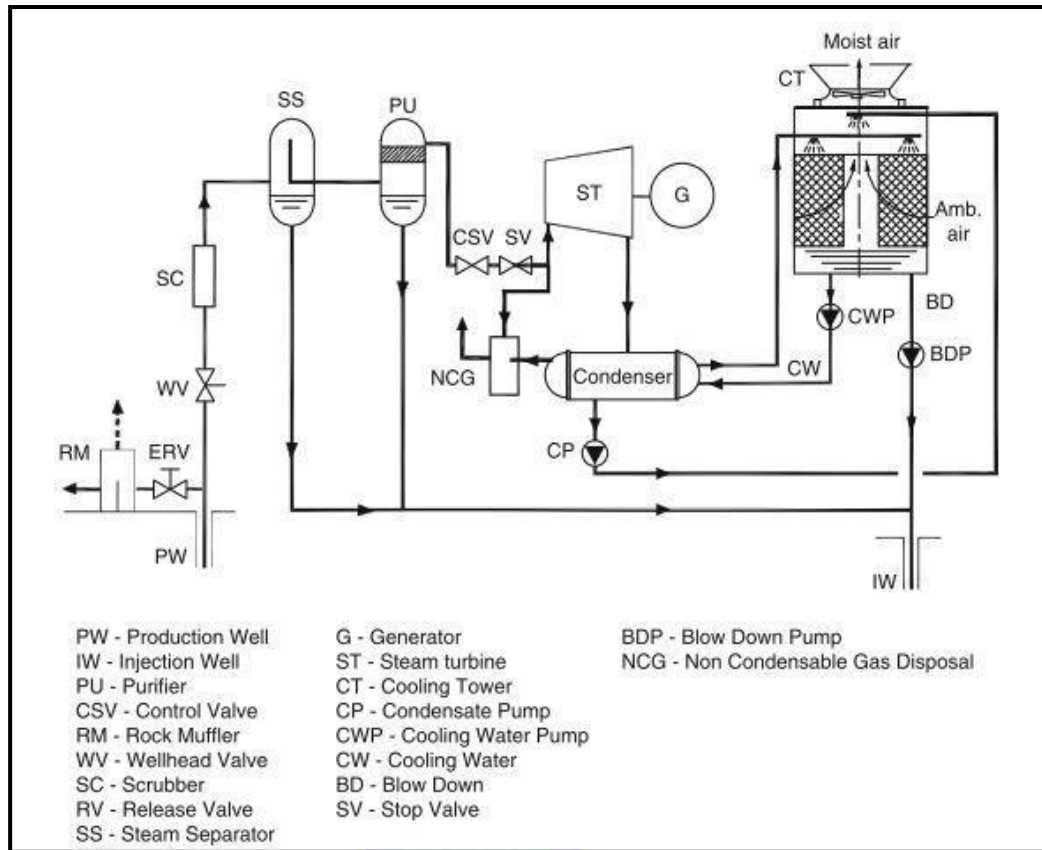
Cuando el pozo geotérmico produce una mezcla bifásica, la planta de un solo Flash es una opción relativamente simple para la conversión de la energía. La mezcla se separará en un separador con una pérdida de presión mínima. Las dos fases se separan debido a su diferencia de densidad inherentemente grande.

El proceso Flash puede ocurrir en diversos puntos de la instalación. Primero, en el depósito geotermal debido a la caída de presión que se da cuando el fluido fluye a través de la formación permeable. Segundo, en el pozo de producción, en cualquier punto desde la entrada hasta la boca del pozo, como resultado de la pérdida de presión debida a la fricción.

⁹ Cárcamo y Rivera (2016). *Diseño conceptual de un sistema híbrido integrado de simple Flash – Binario para una planta geotérmica.*

Y tercero, en la entrada al separador ciclónico como resultado de un proceso de estrangulamiento inducido por una válvula de control.

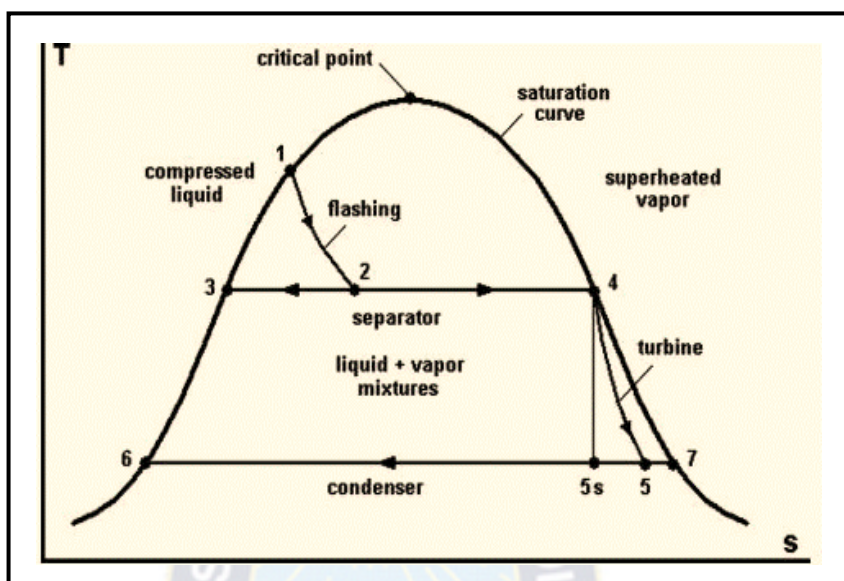
Figura 2.12: Esquema simplificado de una central tipo Flash Simple.



Fuente: Cárcamo y Rivera (2016).

En cada pozo de producción se montan distintos equipos para controlar y monitorear el flujo del fluido geotérmico desde el pozo hasta la planta. Se suelen incluir: varias válvulas, un silenciador (para ventilación de emergencia), tuberías e instrumentación (manómetros de presión y temperatura). Además, tras el proceso de separación, se deben instalar sistemas de goteo a lo largo de la línea de vapor y un filtro de limpieza. A veces se añade un proceso de lavado del vapor para incrementar su pureza.

Figura 2.13: Diagrama Temperatura – Entropía para una planta Flash Simple.



Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

En la *Figura 2.13* vemos el proceso que experimenta el vapor reflejado en un diagrama T – s. El estado 1 representa el fluido geotermal del recurso a cierta presión, y considerado como líquido saturado (o muy próximo a la línea de saturación).

Durante la operación habitual de una planta flash simple existen unos determinados puntos donde se producen las principales emisiones de esta configuración. Estos puntos son:

- Silenciadores.
- Desagües de las tuberías.
- Ventilación de los eyectores de gases no condensables.
- Torre de refrigeración.

El vapor geotérmico, contiene gases no condensables, como sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono o metano, además de otros en pequeñas proporciones. En condiciones normales, estos gases son aislados en el condensador, introducidos en los eyectores y tratados antes de su liberación a la atmósfera.

Por último, es necesario tener en cuenta que la salmuera separada contiene prácticamente todos los minerales existentes en el depósito geotermal, pero en mayor concentración. Estos elementos pueden afectar seriamente a las aguas superficiales o subterráneas si se les permite mezclarse con ellas. Estos elementos pueden ser: arsénico, boro, calcio, litio, magnesio, sodio, entre otros.

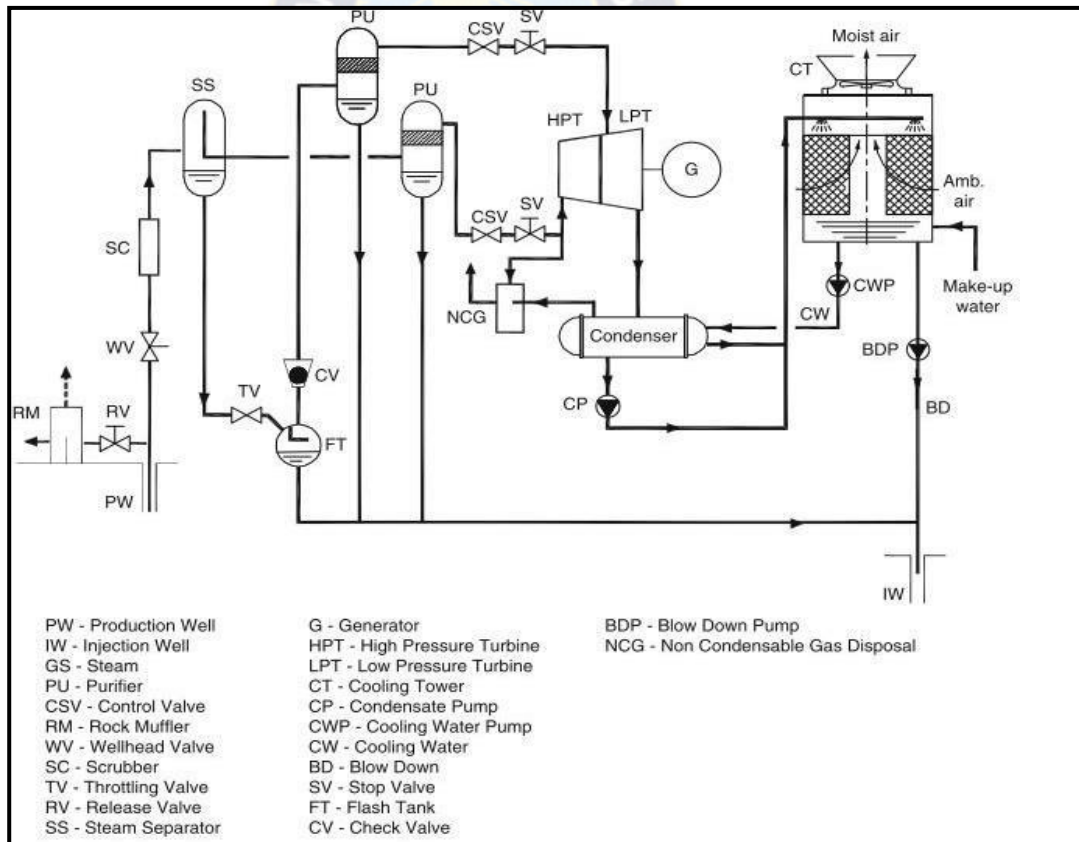
2.4.1.2. Planta geotérmica tipo Double/Triple Flash

Los ciclos de doble flash se justifican debido a las altas temperaturas de la salmuera residual separada. En estos casos se añade otra etapa de separación y la turbina debe estar diseñada para manejar vapor de doble presión. En algunos casos, la temperatura y el caudal de la fuente justifican un sistema de triple flash, añadiendo una tercera etapa de separación.

Si nos centramos en la planta de doble flash, vemos que mejora considerablemente el diseño del flash simple, produciendo entre un 15 y un 25% más de potencia para las mismas condiciones del fluido. La planta es más compleja, costosa y requiere de un mayor mantenimiento, pero la mayor producción energética lo justifica en la mayoría de los casos.

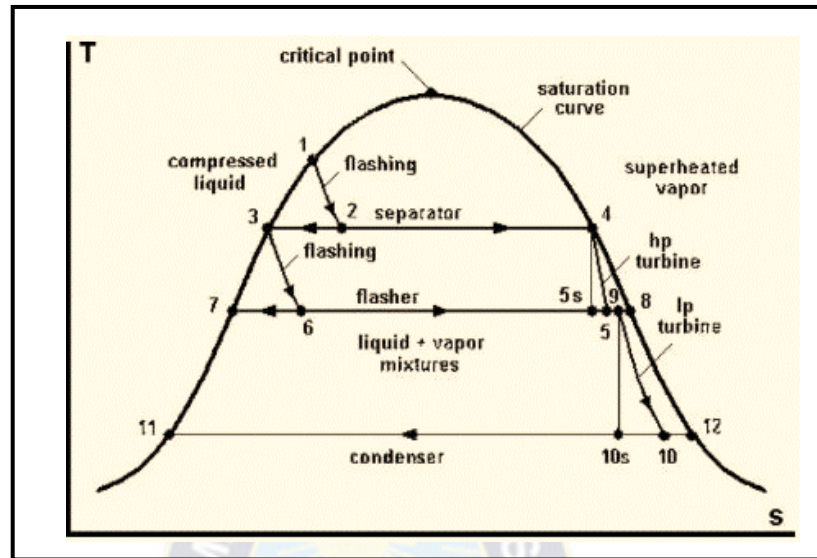
En la *Figura 2.14* vemos un esquema simplificado de una central de configuración Doble Flash. Además, en la *Figura 2.15* vemos el proceso que lleva a cabo el vapor en ella.

Figura 2.14: Esquema simplificado de un tipo central Doble Flash.



Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

Figura 2.15: Diagrama Temperatura - Entropía para una planta Flash Doble.



Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

Del diagrama T - s de la planta Doble Flash destacamos las dos etapas de separación que se identifican perfectamente (1→2 y 3→6) con las dos etapas de expansión correspondiente a cada separación y para cada nivel de presión (4→5 y 9→10). Hay que tener en cuenta un detalle, y es que, si observamos con detenimiento los puntos iniciales de las etapas de expansión, la turbina de baja presión no expande desde el punto 8, que corresponde al vapor saturado separado del segundo separador, sino que expande desde un punto 9 que corresponde a la unión de los flujos 5 y 8.

En cuanto a los aspectos medioambientales, son exactamente los mismos que se describen para una planta de simple flash.

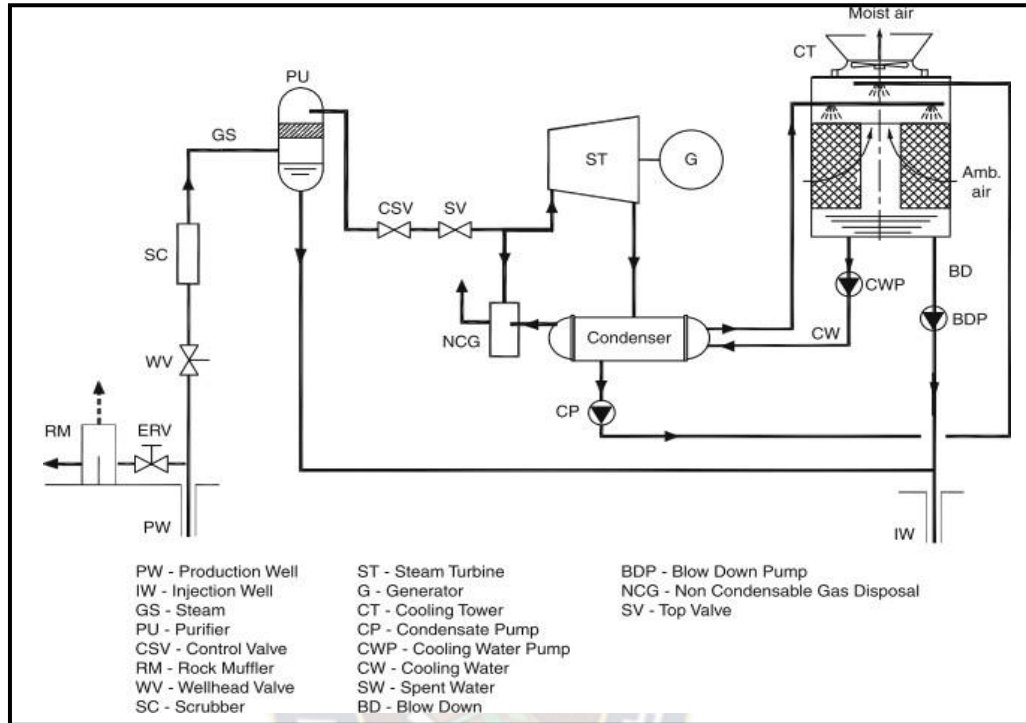
2.4.2. PLANTA DE ENERGÍA VAPOR SECO

Las plantas de vapor seco están en operación desde hace más de 100 años. En ellas, el fluido que llega a la superficie procedente del yacimiento geotérmico está en forma de vapor y en estado de saturación, o ligeramente sobrecalentado (vapor seco). Debido a esto, son las plantas más simples y menos costosas, ya que no hay una salmuera líquida para tomar en cuenta. El vapor seco se dirige a la turbina y se genera electricidad de forma directa.

Una vez que el vapor llega al módulo de potencia, una planta de vapor seco es esencialmente la misma que una planta de vapor de caldera de baja temperatura. Las turbinas son unidades de una sola presión con paletas de reacción de impulso, ya sea de flujo único para unidades más pequeñas o de doble flujo para unidades grandes de más de 50 [MW]. Los condensadores pueden ser de contacto directo o de tipo superficial.

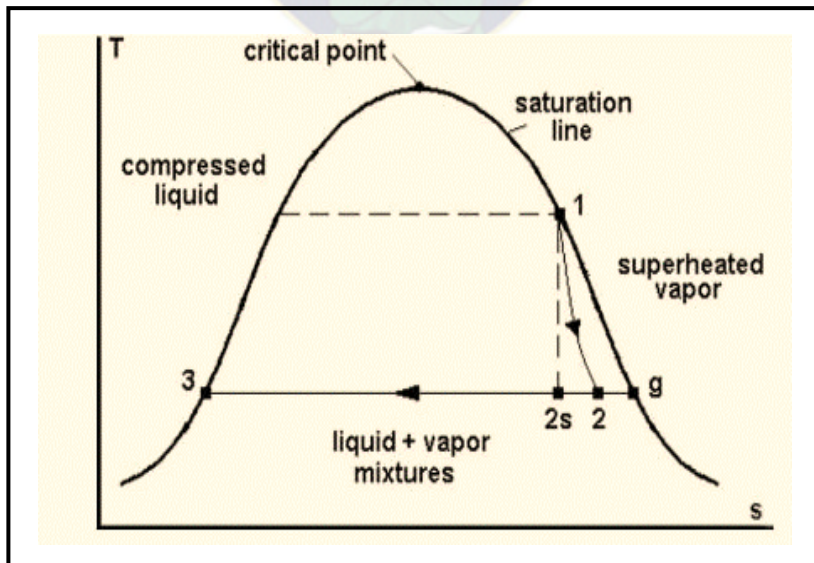
A continuación, se presenta a modo de ejemplo un esquema de una planta de vapor seco y su diagrama T – s (Figura 2.16 y 2.17).

Figura 2.16: Esquema simplificado de una central de Vapor Seco.



Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

Figura 2.17: Diagrama Temperatura - Entropía para una planta de Vapor Seco.



Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

En la *Figura 2.17* se muestran los procesos experimentados por el vapor en una planta de este tipo. Como se comentó antes, los pozos producen vapor en estado de saturación (o ligeramente sobrecalentado), por lo tanto, el punto de partida se sitúa sobre la curva de saturación (en el caso del vapor sobrecalentado, simplemente el punto 1 se desplazaría hacia la derecha).

Las plantas geotérmicas de vapor seco apenas presentan impacto medioambiental. Debido a que no hay fase líquida, no existe una salmuera cargada de minerales por eliminar. Los gases no condensables se aislarán en el condensador y se eliminarán mediante bombas de vacío y se podrán tratar para eliminar el sulfuro de hidrógeno, en caso de que esté presente en niveles considerables. Por último, el exceso de condensado de la torre de refrigeración se reinyecta al igual que cualquier líquido atrapado en las tuberías de transmisión de vapor.

2.4.3. PLANTA DE ENERGÍA CICLO BINARIO

Las plantas geotérmicas de Ciclo Binario son las más similares a las plantas convencionales de combustibles fósiles, ya que el fluido de trabajo circula por un ciclo cerrado real. El fluido de trabajo, seleccionado por sus propiedades termodinámicas (siempre con temperaturas y presiones críticas inferiores a las del agua), recibe calor del fluido geotérmico, evaporándose y expandiéndose en una turbina, generando la energía eléctrica de la planta. Tras expandirse se condensa y se bombea de vuelta al evaporador.

Este sistema permite extraer energía de yacimientos de media temperatura (entre 100 y 150 °C) y de recursos geotermales con elevada salinidad de forma más eficiente que las plantas flash. Además, provocan un impacto ambiental todavía menor al no emitir gases a la atmósfera.

2.4.3.1. Ciclo binario ORC básico

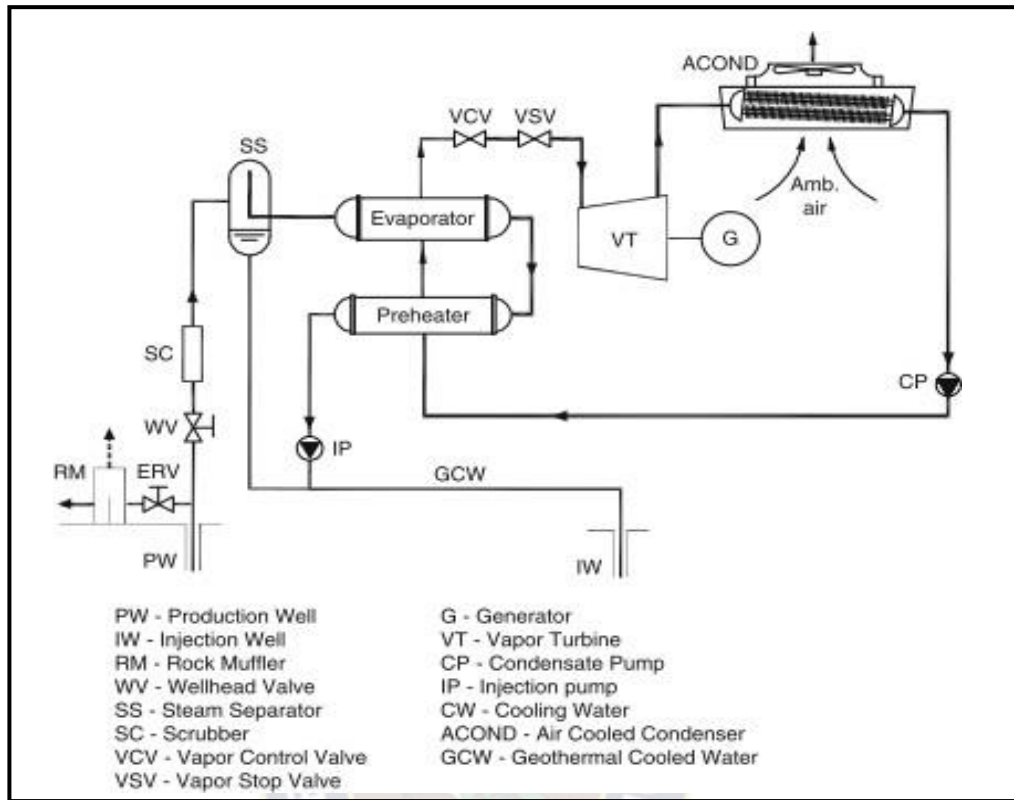
En su forma más básica el ciclo binario ORC es el que se representa en la *Figura 2.18*, y su funcionamiento es el descrito en la introducción a este apartado, puesto que es el más básico de esta familia de plantas geotérmicas. El fluido de trabajo ORC se trata de un fluido de origen orgánico (normalmente un hidrocarburo).

En el esquema representado también hay un separador que divide las fases del fluido y utiliza el vapor para evaporar el fluido de trabajo. Esto no tiene por qué ser así, la planta puede trabajar directamente sin separar las fases.

Típicamente el proceso de calentamiento del fluido de trabajo tiene dos fases. Primero pasa por un precalentador, donde el fluido se lleva a su punto de ebullición para, posteriormente, salir del evaporador como un vapor saturado.

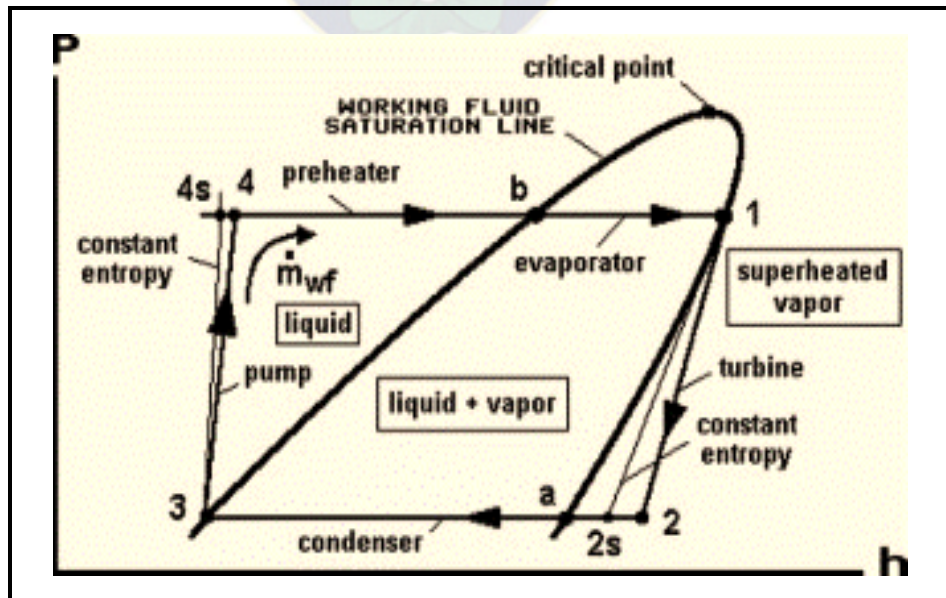
En la *Figura 2.19* vemos el diagrama P – h de una planta binaria básica, para entender mejor su funcionamiento. Este tipo de diagramas suele emplearse para ciclos de refrigeración y aire acondicionado, pero tiene mucha utilidad también en ciclos binarios geotérmicos.

Figura 2.18: Esquema simplificado de una central de ciclo binario ORC básico.



Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

Figura 2.19: Diagrama Presión - Entalpía para una planta de ciclo binario ORC básico.



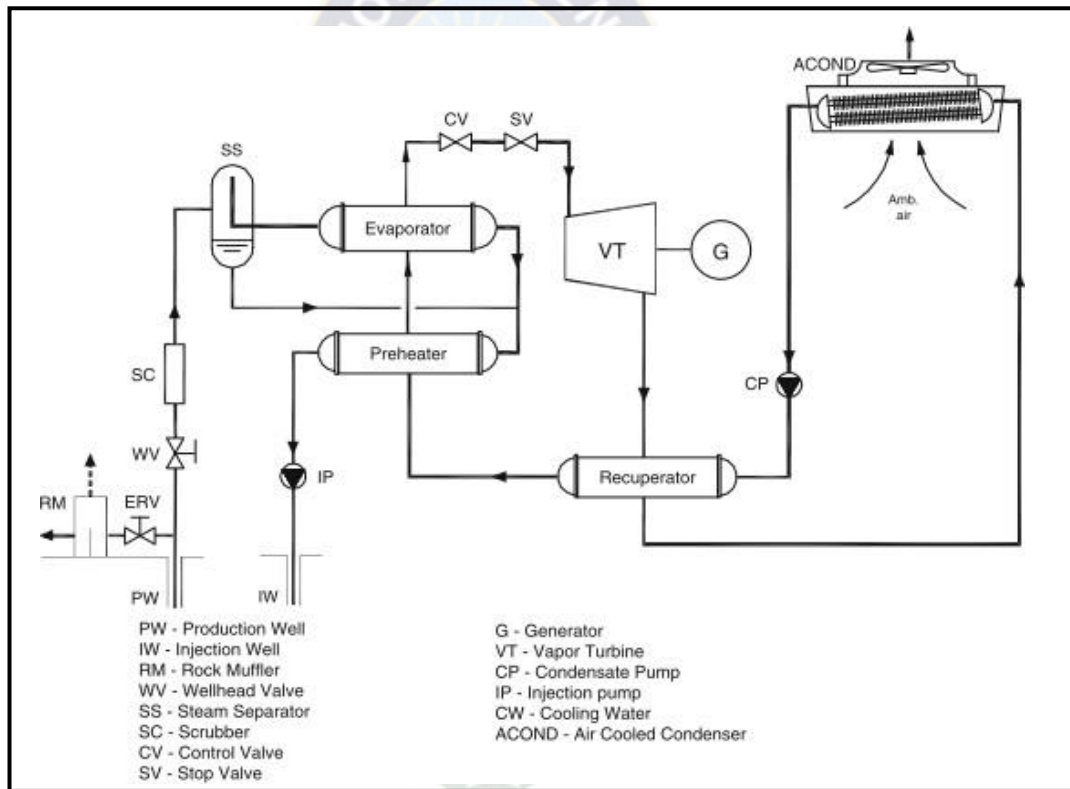
Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

2.4.3.2. Ciclo binario ORC recuperativo

El ciclo binario ORC recuperativo surge para evitar uno de los problemas principales de las instalaciones geotérmicas, el aumento de la escala de sílice en el fluido conforme desciende la temperatura de la salmuera. Para superar parcialmente el límite de temperatura de enfriamiento se añade un recuperador al ciclo, el cual proporciona parte del calor de precalentamiento del vapor que sale de la turbina (ver *Figura 2.20*).

Este recuperador sólo será aplicable cuando el fluido orgánico es del tipo de “expansión seca”, un tipo de fluido donde la expansión en la turbina debe realizarse en la zona seca sobrecalentada, y el vapor expandido contiene calor que debe extraerse antes de la etapa de condensación.

Figura 2.20: Esquema simplificado de una central de ciclo binario ORC recuperativo.



Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

2.4.3.3. Ciclo binario ORC de presión dual

El ciclo binario de presión dual está diseñado para reducir las pérdidas termodinámicas en los intercambiadores de calor del ciclo básico. Estas pérdidas surgen debido a la gran diferencia de temperatura entre la salmuera caliente y el fluido de trabajo frío. Se pueden reducir estas pérdidas, manteniendo cierta cercanía entre la curva de enfriamiento de la salmuera y la curva de calentamiento del fluido de trabajo. El ciclo de presión dual tiene un proceso de calentamiento / ebullición de dos etapas que logra una diferencia de temperatura promedio menos que en el ciclo

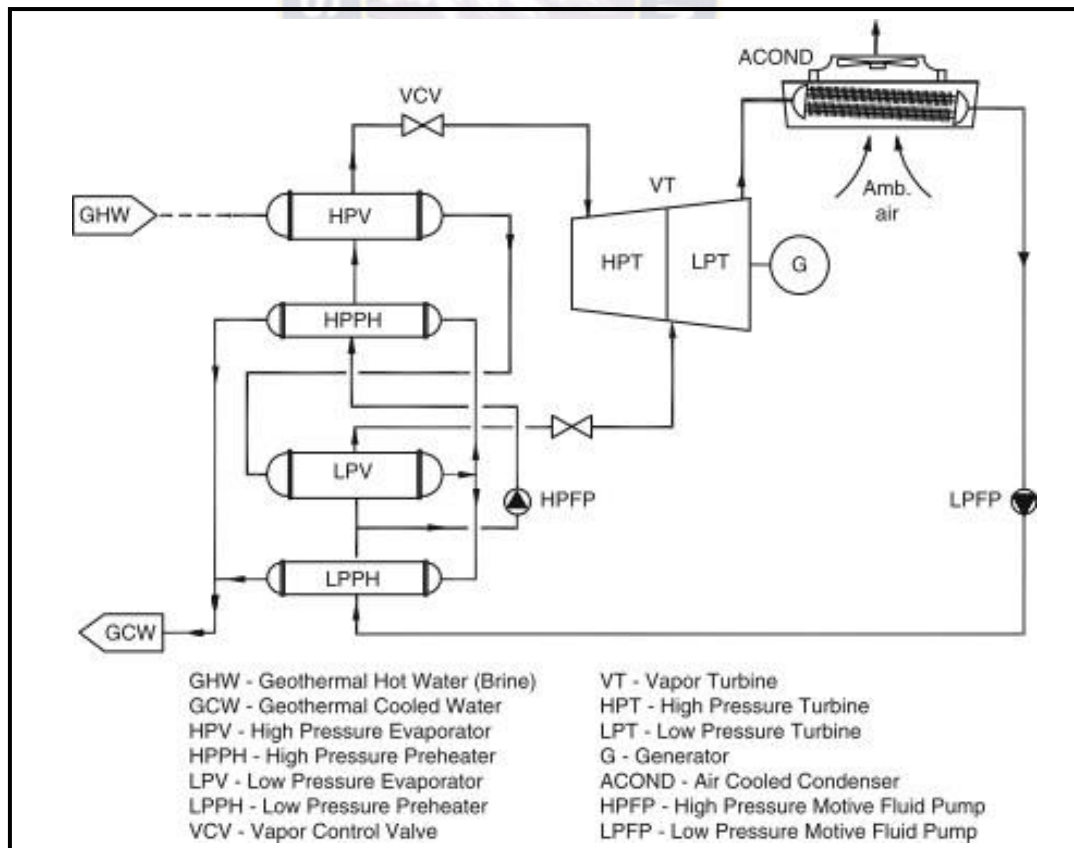
básico. En la *Figura 2.21* se muestra el esquema simplificado de este ciclo. En la *Figura 2.22* se muestra el diagrama P - h de este ciclo.

Tabla 2.1: Temperatura crítica (T_c) y presión crítica (P_c) para distintos fluidos de trabajo.

Fluido	Fórmula	T_c (°C)	P_c (MPa)
n-Butano	C ₄ H ₁₀	150,8	3,718
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	193,9	3,24
Ciclopentano	cyclo-C ₅ H ₁₀	238,55	4,51
Isopentano	i-C ₅ H ₁₂	187,8	3,409
Tolueno	C ₇ H ₈	318,65	4,109
EtilBenceno	C ₈ H ₁₀	344,05	3,609
o-Xileno	C ₈ H ₁₀	357,18	3,732
MM	C ₆ H ₁₈ OSi ₂	245,55	1,925

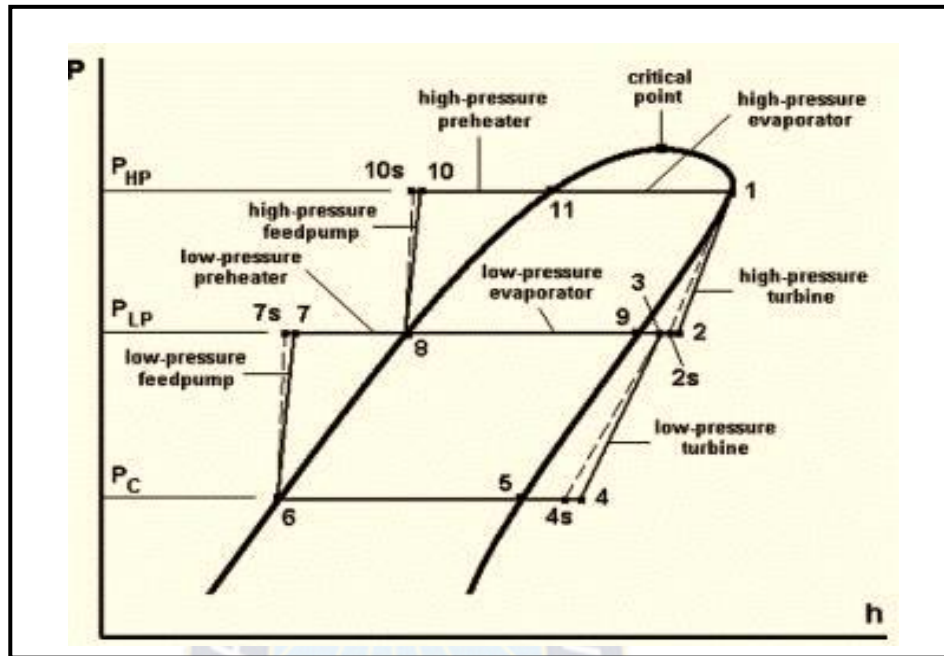
Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

Figura 2.21: Esquema simplificado de una central de ciclo binario ORC de presión dual.



Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

Figura 2.22: Diagrama P - h para una planta de ciclo binario ORC de presión dual.



Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

En todos los casos de estudio la eficiencia térmica de este tipo de ciclos es más baja que para un ciclo básico, sin embargo, tienen una eficiencia de utilización mayor (desde un 6% en temperaturas altas a un 24% en bajas). Esto es debido a que, como se comentó antes, la diferencia de temperatura promedio entre los dos fluidos se reduce, por lo tanto, también se reducen las irreversibilidades, dando lugar a que ingrese en el ciclo más energía de la salmuera, lo que conduce a una mayor eficiencia de utilización.

2.4.3.4. Ciclo binario Kalina

El ciclo binario Kalina se distingue de las configuraciones antes mencionadas en los siguientes aspectos:

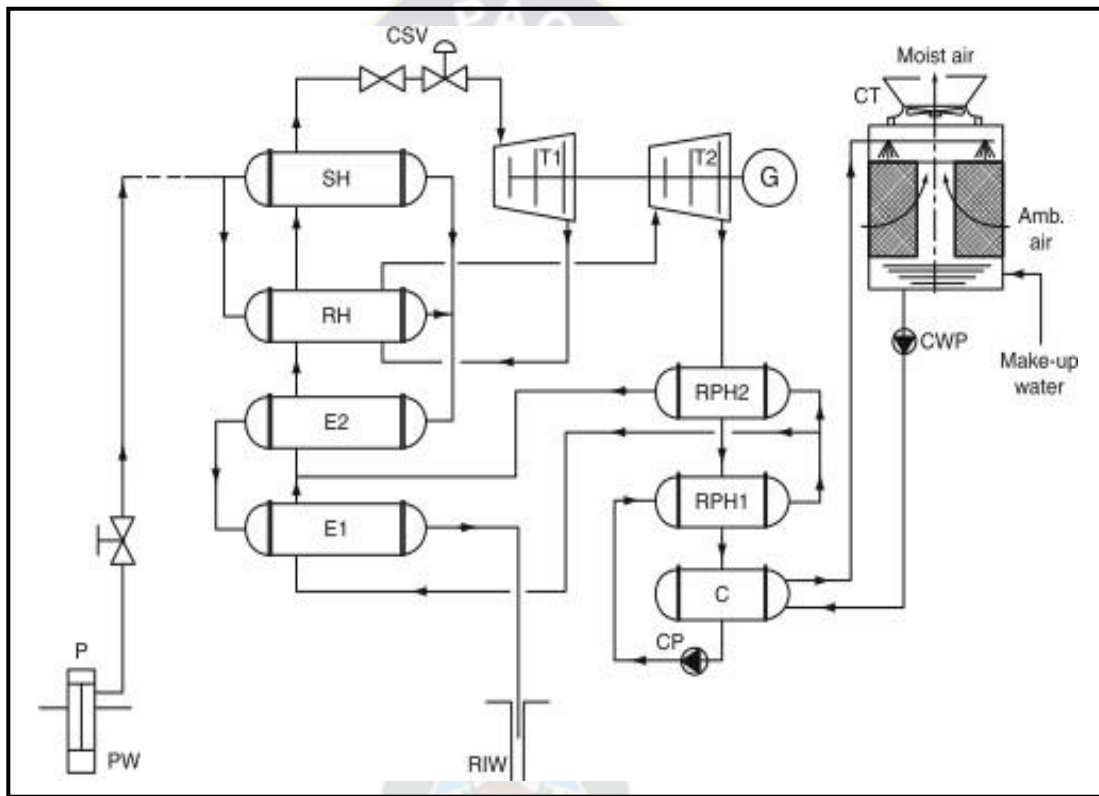
- El fluido de trabajo es una mezcla binaria de H_2O y NH_3 .
- La evaporación y la condensación ocurren a temperatura variable.
- El ciclo incorpora recuperación de calor del escape de la turbina.
- La composición de la mezcla puede variarse durante en algunas versiones.

Como consecuencia, los ciclos de Kalina muestran un mejor rendimiento termodinámico de los intercambiadores de calor al reducir las irreversibilidades. Este ciclo necesita un recalentador, puesto que la mezcla agua – amoníaco conduce a mezclas húmedas en la turbina. Además, la planta requiere de buenos intercambiadores de calor, puesto que se transfiere más calor que en una planta binaria de la misma potencia de salida (aproximadamente un 25% más de transferencia de calor requerida).

La reducción del costo debido al condensador más pequeño es equiparable al aumento del costo adicional de los intercambiadores. Sin embargo, a largo plazo la mayor eficiencia resultante debería significar menores costos operativos.

La *Figura 2.23* muestra un esquema básico del ciclo Kalina. La planta es más compleja que una planta binaria básica, en especial cuando se usa una columna de destilación para variar la composición de la mezcla (*Figura 2.24*).

Figura 2.23: Esquema simplificado de una central de Ciclo Binario Kalina con un recalentador y dos precalentadores recuperativos.



Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

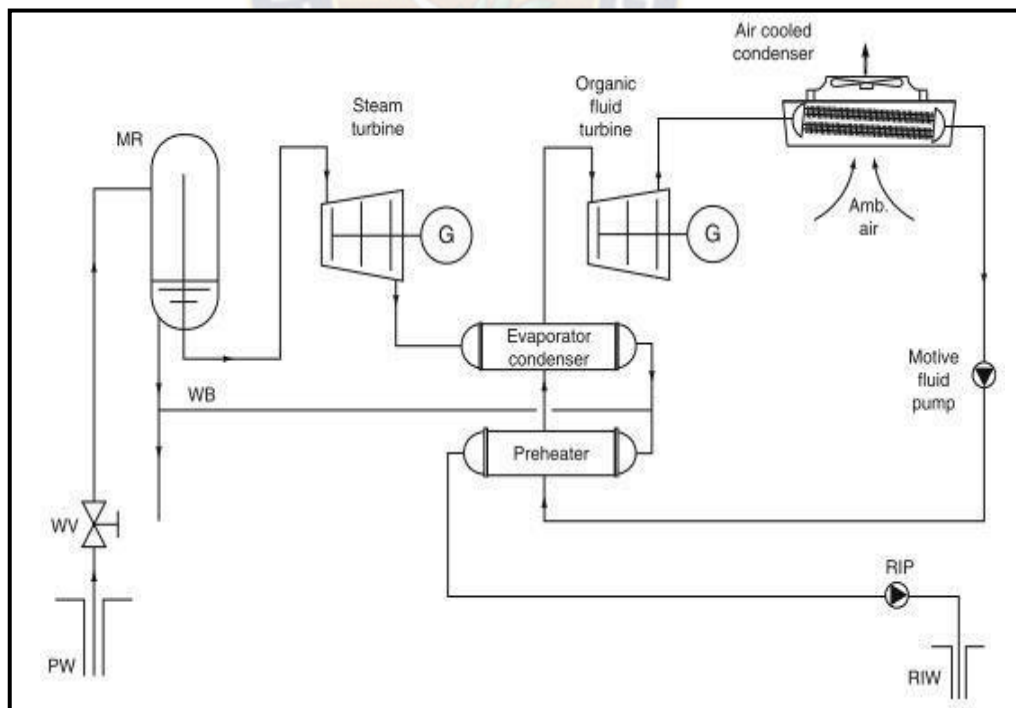
2.4.4.1. Ciclo combinado Flash – Binario

El ciclo combinado Flash – Binario se ha utilizado en plantas de ciclo flash simple que con el transcurso de los años han ido perdiendo capacidad de producción y se ha instalado un ciclo binario ORC básico que emplea el líquido separado del proceso flash para calentar y evaporar el fluido de trabajo (Figura 2.25).

Este sistema consigue una ganancia de energía respecto al ciclo flash simple sin necesidad de añadir nuevos pozos de producción.

Teniendo en cuenta que el uso de turbinas de vapor de condensación presenta ciertas desventajas, como la alta humedad en etapas de baja presión o la necesidad de bombas de vacío si hay presencia de gases no condensables, se ha desarrollado otro sistema combinado Flash – Binario. Esta configuración sólo utiliza la parte de alta presión de la turbina (configuración “back-pressure”) y emplea el vapor de escape como fuente de calor para el ciclo binario ORC (Figura 2.26). De esta forma se evitan ambos inconvenientes: la turbina de vapor es más pequeña, limitando la humedad de vapor, mientras que la presión parcial de los gases no condensables es pequeña y su efecto sobre la condensación en el condensador es menor. Además, la presión de estos gases está por encima de la presión atmosférica, por lo tanto, pueden expulsarse sin necesidad de bombas de vacío, o reinyectarse en el pozo de inyección.

Figura 2.26: Esquema simplificado de una central de ciclo binario ORC.



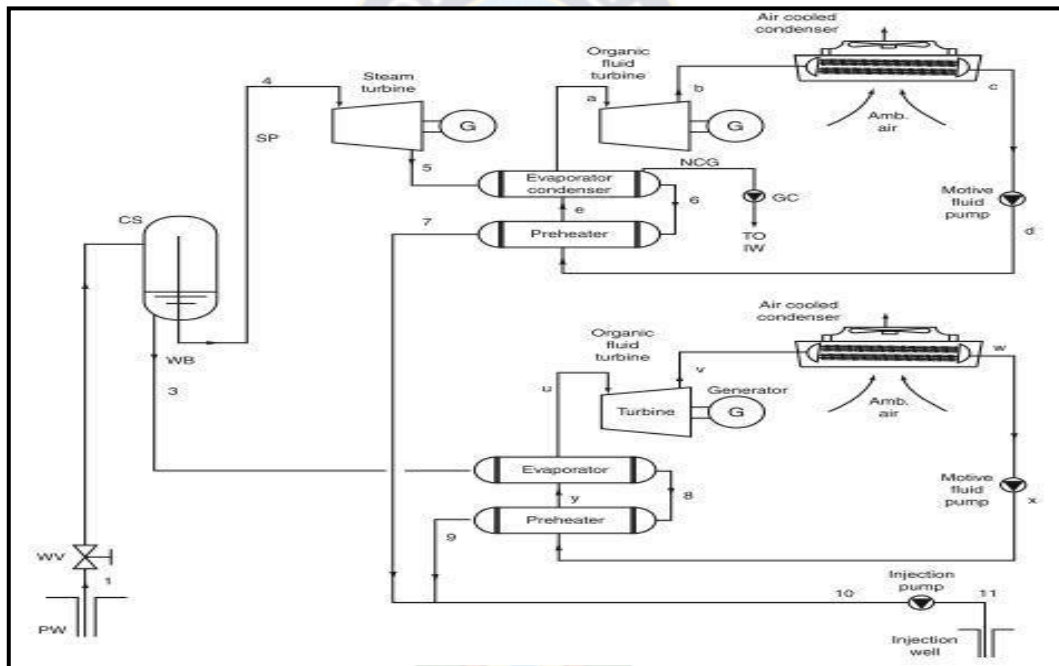
Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

2.4.4.2. Ciclo integrado Flash – Binario

Cuando se integran un ciclo flash simple y un ciclo binario ORC obtenemos una planta geotérmica con prácticamente cero emisiones. En ella, el vapor separado se expande en una turbina de vapor con configuración “back-pressure” y posteriormente es empleado para precalentar y evaporar un primer ciclo binario. El líquido separado es empleado para un segundo ciclo binario (Figura 2.27).

De esta manera se aprovecha al máximo el calor procedente del recurso geotermal. Los gases no condensables fluyen con el vapor a través de la turbina de vapor y al evaporador, donde son aislados, y comprimidos para unirse a la salmuera de reinyección. El único impacto ambiental existente es el calor rechazado a la atmósfera por los condensadores del ciclo binario.

Figura 2.27: Esquema simplificado de una central de ciclo integrado Flash - Binario.



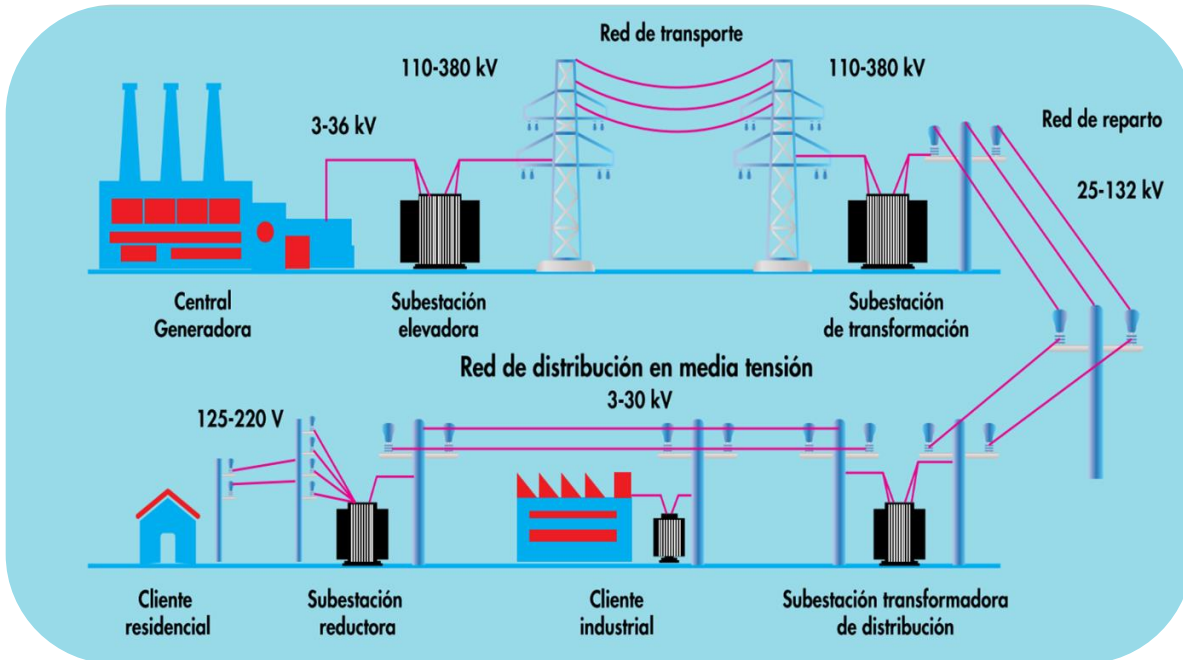
Fuente: Carcamo y Rivera (2016).

2.5. SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Una subestación eléctrica es una instalación en donde se reúnen equipos eléctricos de alta tensión como transformadores de poder, interruptores, transformadores de medida, desconectadores, etc., las cuales, dependiendo de su función en el sistema, interconectan a otras subestaciones, formando así una gigantesca red, llamada “SISTEMA ELÉCTRICO”. Las subestaciones se podrían describir como puntos de conexión o nodos al sistema eléctrico. Dicho en otras palabras, es como la intersección de una calle, un punto común para varias direcciones reguladas por un semáforo que define quién va primero y quién va después.

Se entiende por subestación eléctrica al conjunto de máquinas, aparatos y circuitos que tiene la función de modificar el parámetro de la potencia es decir la tensión y corriente para proveer un medio de interconexión y despacho entre las diferentes líneas de un sistema.

Figura 2.28: Sistema eléctrico de potencia.



Fuente: Revista Eléctrica (2011).

Elementos principales de una subestación son¹⁰:

a) Transformador

Es una máquina eléctrica estática que transfiere energía eléctrica de un circuito a otro conservando la frecuencia constante, opera bajo el principio de inducción electromagnética y tiene circuitos eléctricos que están enlazados magnéticamente y aislados eléctricamente.

b) Interruptor de potencia

Interrumpe y restablece la continuidad de un circuito eléctrico. La interrupción se debe efectuar con carga o corriente de corto circuito.

c) Restaurador

Es un interruptor de aceite con sus tres contactos dentro de un mismo tanque y que opera en capacidades interruptivas bajas. Los restauradores están construidos para funcionar con tres operaciones de recierre y cuatro aperturas con un intervalo entre una y otra; en la última apertura el cierre debe ser manual, ya que indica que la falla es permanente.

¹⁰ Revista Eléctrica (2011). Subestaciones Eléctricas

d) Cuchillas fusibles

Son elementos de conexión y desconexión de circuitos eléctricos. Tienen dos funciones: una como cuchilla desconectadora, para lo cual se conecta y desconecta, y otra como elemento de protección. El elemento de protección lo constituye el dispositivo fusible que se encuentra dentro del cartucho de conexión y desconexión.

e) Cuchillas desconectadoras y cuchillas de prueba

Sirven para desconectar físicamente un circuito eléctrico. Por lo general se operan sin carga, pero con algunos aditamentos se puede operar con carga hasta ciertos límites.

f) Apartarrayos

Se encuentra conectado permanentemente en el sistema, descarga la corriente a tierra cuando se presenta una sobretensión de determinada magnitud. Su operación se basa en la formación de un arco eléctrico entre dos explosores cuando se alcanza el valor para el cual esta calibrado o dimensionado.

g) Transformadores de instrumento

Existen dos tipos: transformadores de corriente (TC), cuya función principal es cambiar el valor de la corriente en su primario a otro en el secundario; y transformadores de potencial (TP), cuya función principal es transformar los valores de voltaje sin tomar en cuenta la corriente. Estos valores sirven como lecturas en tiempo real para instrumentos de medición, control o protección que requieran señales de corriente o voltaje.

h) Barras o buses

Son las terminales de conexión por fase.

2.5.1. CLASIFICACIÓN DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS¹¹

Las subestaciones eléctricas se pueden clasificar en:

2.5.1.1. Subestaciones eléctricas por nivel de tensión

Las subestaciones eléctricas trabajan con diferentes niveles de tensión, que dependen de las necesidades propias del proyecto. El nivel de tensión que se utilice dependerá de cada país, pero se pueden clasificar por rangos de la siguiente manera:

Baja Tensión (LV): Una tensión nominal menor o igual a 1000V.

Media Tensión (MV): Una tensión nominal mayor a 1000V y menor que 100kV.

Alta Tensión (HV): Una tensión nominal igual o mayor a 100kV e igual o menor que 230kV.

Extra Alta Tensión (EHV): Una tensión nominal mayor que 230kV, pero menor que 1000kV.

¹¹ RTE (2021). *Subestaciones Eléctricas*.

Ultra Alta Tensión (UHV): Una tensión nominal igual o mayor a 1000kV.

Figura 2.29: Simbología usada en los diagramas de Subestaciones.



Fuente: Revista Eléctrica (2011).

2.5.1.2. Subestaciones eléctricas por su funcionalidad

Las subestaciones también pueden ser clasificadas según su funcionalidad:

Transformadoras Elevadoras: Este tipo de subestación eléctrica eleva la tensión generada a niveles mucho más altos para poder transportarla.

Transformadoras de Bajada: Este tipo de subestación eléctrica baja la tensión a niveles mucho más bajos para poder distribuirla.

De Maniobra: Normalmente son aquellas que conectan más de un circuito, no se sube ni se baja la tensión, sólo sirve como un nodo en el sistema eléctrico.

2.5.1.3. Subestaciones eléctricas por área de servicio

Las subestaciones eléctricas también las podemos identificar según el área de servicio en la cual se están desempeñando. Aquí tenemos a las subestaciones de:

Generación: Estas subestaciones las encontramos en las mismas generadoras eléctricas. Desde estas subestaciones se sube la tensión para inyectarlas a los sistemas de transmisión.

Transmisión: Estas subestaciones funcionan como nodos del sistema eléctrico, para puntos de conexión con generadoras, distribuidoras y otras subestaciones de transmisión. Generalmente se encuentran en las periferias de las ciudades. No obstante, pueden encontrarse igualmente en las ciudades.

Distribución: Estas son subestaciones de bajada ubicada en las ciudades mismas, desde esta se alimentan los sectores industriales, las grandes ciudades y los clientes finales (casas).

Figura 2.30: *Subestación eléctrica.*



Fuente: RTE (2021).

2.5.1.4. Subestaciones electricas por su aislamiento

Otra forma de clasificar las subestaciones es por su aislamiento, de las cuales tenemos:

Aire: Este tipo de subestaciones tiene como medio de aislamiento el aire, también son las normalmente denominadas subestaciones convencionales. En la actualidad, es muy raro encontrar nuevas construcciones con este tipo de aislamiento. Fue parte importante de las subestaciones en el pasado, pero en la actualidad existen medios de aislamiento mucho más eficientes.

SF6: El gas de aislamiento SF6 (Hexafloruro de Azufre) es un medio de aislamiento superior al aire y es ampliamente utilizado en la actualidad para los equipos de alta tensión. Todo el equipamiento eléctrico principal se introduce en el interior de una envoltura metálica inmerso en SF6, con esto es posible reducir las distancias de aislamiento drásticamente por lo que las extensiones de terreno de la subestación se reducen más de un 50% respecto de un equipamiento

tradicional. Aquí se encuentra inmerso el conjunto completo de equipos eléctricos interruptor, desconectador etc. Estas son las denominadas GIS.

Híbridas: Aquí es similar a las subestaciones de SF6, pero la diferencia es que los equipos de conexión de cada circuito están en una la envoltura metálica inmersa en SF6 de forma separada. Vale decir, por ejemplo, el interruptor de poder, sus contactos internamente están asilados en SF6 y es un solo equipo eléctrico. De esta manera, puedo tener desconectores tradicionales, con interruptores en SF6 operando en la subestación. Una mezcla entre equipos de aire y SF6.

En la actualidad, es difícil encontrar una subestación con solo tipo de aislamiento, salvo las subestaciones más nuevas. Por lo general, las subestaciones son una mezcla de las mencionadas anteriormente.

Cabe señalar que en la línea de tiempo de la evolución de los equipos eléctricos se usó otros medios de aislamiento como aceite, por ejemplo, siendo el SF6 el más reciente y el que está vigente en la actualidad. Así mismo, los equipos eléctricos fueron lentamente pasando a SF6, como los interruptores de poder, hasta llegar a la tecnología GIS, donde todo un sistema de conexión eléctrica se encuentra inmerso en SF6 como conjunto.

2.5.2. SUBESTACIONES ELÉCTRICAS EN PLANTAS GENERADORAS DE ENERGÍA

Estas subestaciones se encuentran adyacentes a las centrales eléctricas plantas generadoras de electricidad para modificar los parámetros de la potencia por: los generadores electromecánicos para permitir la transmisión en alta tensión en las líneas de transmisión, respecto a este se puede suministrar una potencia entre 5 y 25 [MW] y la transmisión dependiendo del volumen de energía y la distancia se puede efectuar a 69, 85, 115, 138, 230 o 400 [kV], en algunos países se emplean tensiones de transmisión de 765, 800 y hasta 1200 [kV] en Corriente Alterna [AC].

CAPÍTULO III

CONCEPTOS BÁSICOS DE TERMODINÁMICA

3.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo inicia con un repaso a conceptos básicos y fundamentales de la termodinámica haciendo énfasis en la energía, transferencia y mecanismos de energía. Continúa con la explicación de algunos conceptos como sistema, estado, postulado de estado, equilibrio y proceso. Posteriormente se presenta la primera Ley de la Termodinámica, eficiencia de dispositivos mecánicos y eléctricos, diagrama de procesos de cambio de fase.

También realizamos la explicación de los dispositivos que dimensionaremos para la planta geotérmica: turbinas, válvula de estrangulamiento, intercambiadores de calor y flujo de tuberías. El estudio cuidadoso de estos conceptos es esencial para lograr una buena comprensión de los temas tratados en este capítulo.

3.2. ENERGÍA Y TRANSFERENCIA DE ENERGÍA¹²

3.2.1. FORMAS DE ENERGÍA

La energía puede existir en varias formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, cuya suma conforma la energía total **E** de un sistema, la cual se denota por unidad de masa mediante *e* y se expresa como:

$$e = \frac{E}{m} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \dots \text{ec. (3.1)}$$

En el análisis termodinámico, con frecuencia es útil considerar dos grupos para las diversas formas de energía que conforman la energía total de un sistema: *macroscópicas* y *microscópicas*.

- a) Las formas **macroscópicas** de energía son las que posee un sistema como un todo en relación con cierto marco de referencia exterior, como las energías cinética y potencial.
- b) Las formas **microscópicas** de energía son las que se relacionan con la estructura molecular de un sistema y el grado de la actividad molecular, y son independientes de los marcos de referencia externos. La suma de todas las formas microscópicas de energía se denomina **energía interna** de un sistema y se denota mediante *U*.

La energía macroscópica de un sistema se relaciona con el movimiento y la influencia de algunos factores externos como la gravedad, el magnetismo, la electricidad y la

¹² Boles y Çengel (2011). *TERMODINÁMICA*

tensión superficial. La energía que posee un sistema como resultado de su movimiento en relación con cierto marco de referencia se llama **energía cinética (EC)**.

Cuando todas las partes de un sistema se mueven con la misma velocidad, la energía cinética se expresa como:

$$EC = m \frac{v^2}{2} \quad [kJ] \dots ec. (3.2)$$

O bien, por unidad de masa,

$$ec = \frac{v^2}{2} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \dots ec. (3.3)$$

La energía que posee un sistema como resultado de su incremento de altura en un campo gravitacional se llama **energía potencial (EP)** y se expresa como:

$$EP = mgz \quad [kJ] \dots ec. (3.4)$$

O bien, por unidad de masa,

$$ep = gz \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \dots ec. (3.5)$$

Los efectos magnéticos, eléctrico y de tensión superficial son significativos sólo en casos especiales y en general se ignoran. En ausencia de esta clase de efectos, la energía total de un sistema consta sólo de las energías cinética, potencial e interna, y se expresa como:

$$E = U + EC + EP = U + m \frac{v^2}{2} + mgz \quad [kJ] \dots ec. (3.6)$$

O bien, por unidad de masa,

$$e = u + ec + ep = u + \frac{v^2}{2} + gz \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \dots ec. (3.7)$$

Los volúmenes de control en general están relacionados con el flujo de un fluido durante largos periodos, y es conveniente expresar en forma de tasa el flujo de energía asociado al flujo de un fluido. Esto se consigue al incorporar el flujo másico \dot{m} , que es *la cantidad de masa que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo*; y se relaciona con el flujo volumétrico \dot{V} , definido como el volumen de un fluido que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo, mediante:

a) Másico:

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} = \rho * A_t * V_{prom} \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \dots ec. (3.8)$$

Que es análogo a $m = \rho * V$, donde ρ es la densidad del fluido, A_t el área de sección transversal de flujo y V_{prom} es la velocidad media del flujo normal a A_t .

El punto sobre el símbolo se usa para indicar tasa de cambio respecto al tiempo. Entonces, el flujo de energía asociado con un fluido que fluye a una tasa de \dot{m} es:

b) Flujo de energía:

$$\dot{E} = \dot{m} * e \quad \left[\frac{kJ}{s} \text{ o } kW \right] \dots \text{ ec. (3.9)}$$

3.2.1.1. Energía Mecánica

La **Energía Mecánica** se puede definir como la forma de energía que se puede convertir completamente en trabajo mecánico de modo directo mediante un dispositivo mecánico como una turbina ideal. Las formas más familiares de energía mecánica son la cinética y la potencial. Sin embargo, la energía térmica no es energía mecánica puesto que no se puede convertir en trabajo de forma completa y directa (segunda ley de la termodinámica). El trabajo de flujo se expresa en términos de las propiedades del fluido y es conveniente considerarlo como parte de la energía de un fluido en movimiento y llamarlo energía de flujo. Por lo tanto, la energía mecánica de un fluido en movimiento por unidad de masa se puede expresar como:

$$e_{mecanica} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \dots \text{ ec. (3.10)}$$

Dónde:

P/ρ : Es la energía de flujo por unidad de masa.

$V^2/2$: Es la energía cinética por unidad de masa.

gz : Es la energía potencial del fluido por unidad de masa.

También es posible expresarla por unidad de tiempo.

$$\dot{E}_{mecanica} = \dot{m} * e_{mecanica} = \dot{m} * \left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right) \dots \text{ ec. (3.11)}$$

Dónde:

\dot{m} = es el flujo másico del fluido.

Entonces el cambio de la energía mecánica de un fluido durante flujo incompresible ($\rho = \text{constante}$) es:

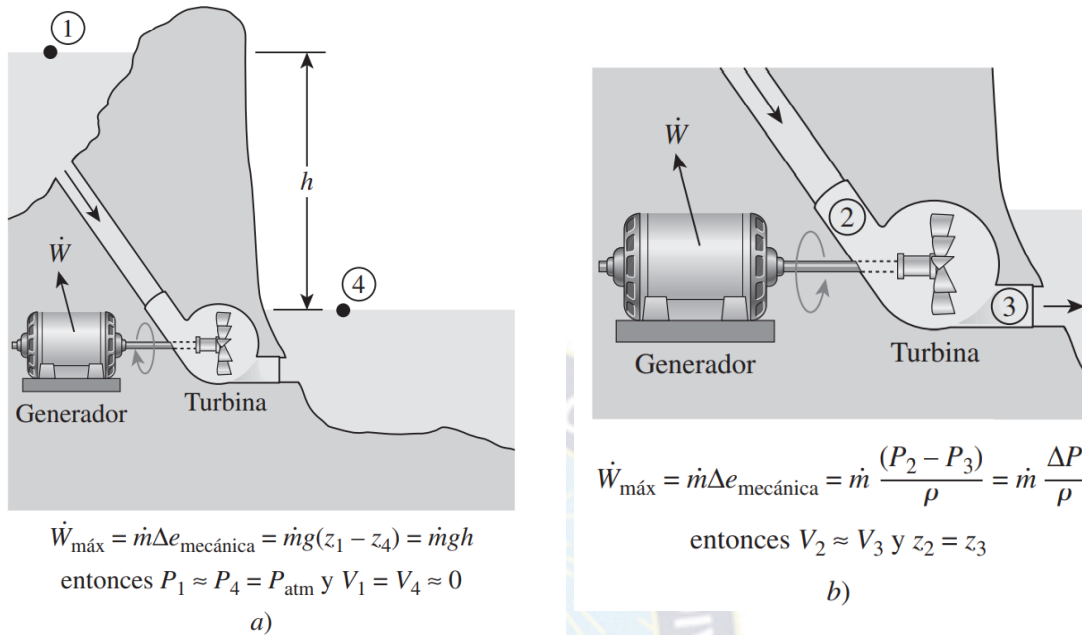
$$\Delta e_{mecanica} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g * (z_2 - z_1) \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \dots \text{ ec. (3.12)}$$

Y:

$$\Delta \dot{E}_{mecanica} = \dot{m} * \Delta e_{mecanica} = \dot{m} * \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g * (z_2 - z_1) \right) \quad [kW] \dots \text{ ec. (3.13)}$$

Por lo tanto, la energía mecánica de un fluido no cambia durante el flujo si su presión, densidad, velocidad y altura permanecen constantes. En ausencia de pérdidas, el cambio de energía mecánica representa el trabajo mecánico suministrado al fluido (si $\Delta e_{mecanica} > 0$) o extraído del fluido (si $\Delta e_{mecanica} < 0$). La potencia máxima (ideal) generada por una turbina, por ejemplo, es $W_{max} = \dot{m} * \Delta e_{mecanica}$ como se muestra en la *Figura 3.1*.

Figura 3.1: Energía mecánica mediante una turbina hidráulica y generador ideal.



En ausencia de pérdidas irreversibles, la potencia máxima producida es proporcional a:

a) El cambio en la elevación de la superficie del agua entre los reservorios de aguas arriba y aguas abajo, o

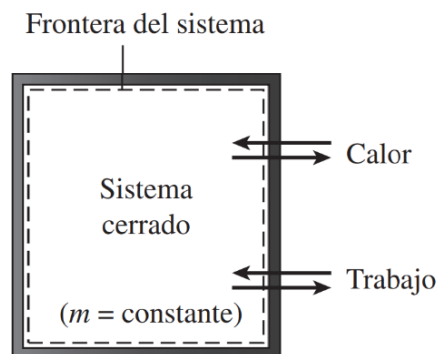
b) La caída de presión del agua desde el punto inmediato aguas arriba de la turbina hasta el punto inmediatamente posterior de la turbina.

Fuente: Boles y Çengel (2011).

3.2.2. TRANSFERENCIA DE ENERGÍA POR CALOR

La energía puede cruzar la frontera de un sistema cerrado en dos formas distintas: calor y trabajo (Figura 3.2). Es importante distinguir entre estas dos formas de energía, por lo que primero se analizarán, con el propósito de conformar una base sólida para el desarrollo de las leyes de la termodinámica.

Figura 3.2: Transferencia de calor y trabajo en un sistema cerrado.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

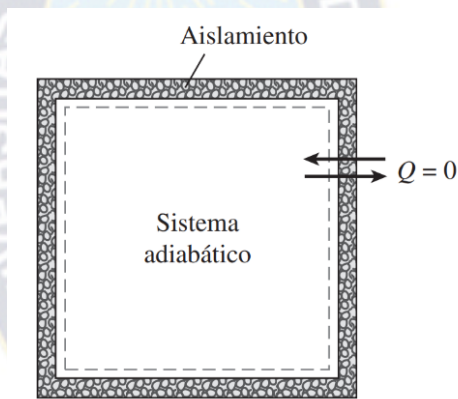
3.2.2.1. Calor en termodinámica

El calor se define como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas debido a una diferencia de temperatura. Es decir, una interacción de energía será calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. Entonces se deduce que no puede haber ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se hallan a la misma temperatura.

Un proceso durante el cual no hay transferencia de calor se denomina proceso adiabático (*Figura 3.3*). El término adiabático proviene de la palabra griega adiabatos, que significa “no pasar”. Hay dos maneras en que un proceso puede ser adiabático:

1. El sistema está bien aislado de modo que sólo una cantidad insignificante de calor cruza la frontera
2. Tanto el sistema como el exterior están a la misma temperatura y por lo tanto no hay fuerza impulsora (diferencia de temperatura) para la transferencia de calor.

Figura 3.3: Proceso adiabático, un sistema no intercambia calor con el exterior.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

Como forma de energía, el calor tiene unidades de energía, la más común es el kJ (o Btu). La transferencia de calor de un sistema por unidad de masa se denota como q y se determina a partir de:

$$q = \frac{Q}{m} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \dots \text{ec. (3.14)}$$

La tasa de transferencia de calor se expresa con \dot{Q} , donde el punto significa la derivada con respecto al tiempo, o “por unidad de tiempo”. La tasa de transferencia de calor \dot{Q} tiene las unidades [kJ/s], equivalente a [kW]. Cuando \dot{Q} varía con el tiempo, la cantidad de transferencia de calor durante un proceso se determina integrando \dot{Q} sobre el intervalo de tiempo del proceso:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \text{ [kJ]} \dots \text{ec. (3.15)}$$

3.2.3. TRANSFERENCIA DE ENERGÍA POR TRABAJO

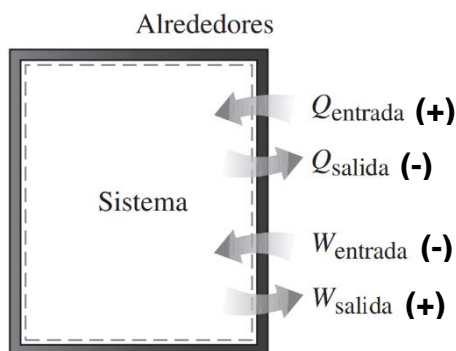
Al igual que el calor, el trabajo es una interacción de energía que ocurre entre un sistema y el exterior. La energía puede cruzar la frontera de un sistema cerrado en forma de calor o trabajo; entonces, *si la energía que cruza la frontera de un sistema cerrado no es calor, debe ser trabajo*. Es fácil reconocer el calor: su fuerza impulsora es una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno. Por lo tanto, se puede decir simplemente que una interacción de energía que se origina por algo distinto a una diferencia de temperatura entre un sistema y el exterior es trabajo. De manera más específica, *el trabajo es la transferencia de energía relacionada con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia*.

El trabajo es también una forma de energía transferida como calor y por lo tanto tiene unidades de energía como kJ. El trabajo realizado durante un proceso entre los estados 1 y 2 se denota por W_{12} o sólo W . El trabajo por unidad de masa de un sistema se denota mediante w y se expresa como:

$$w = \frac{W}{m} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \dots \text{ec. (3.16)}$$

Calor y trabajo son cantidades direccionales y la descripción completa de sus interacciones requieren la especificación de la magnitud y la dirección. Una forma de hacer esto es adoptar un convenio de signo: generalmente se acepta para las interacciones de calor y trabajo un **convenio de signo formal**, tal que *la transferencia de calor hacia un sistema y el trabajo hecho por un sistema son positivos; la transferencia de calor desde un sistema y el trabajo hecho sobre un sistema son negativos*.

Figura 3.4: Especificaciones de la dirección de calor y trabajo.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

El calor y el trabajo son mecanismos de transferencia de energía entre un sistema y el exterior, y existen muchas similitudes entre ellos:

1. Tanto el calor como el trabajo pueden ser reconocidos en las fronteras de un sistema cuando las cruzan; es decir, son fenómenos de frontera.
2. Los sistemas poseen energía, pero el calor o el trabajo no.

3. Ambos se relacionan con un proceso, no con un estado. A diferencia de las propiedades, ni el calor ni el trabajo tienen significado en un estado.
4. Ambos son función de la trayectoria (es decir, sus magnitudes dependen de la trayectoria seguida durante un proceso, así como de los estados iniciales y finales).

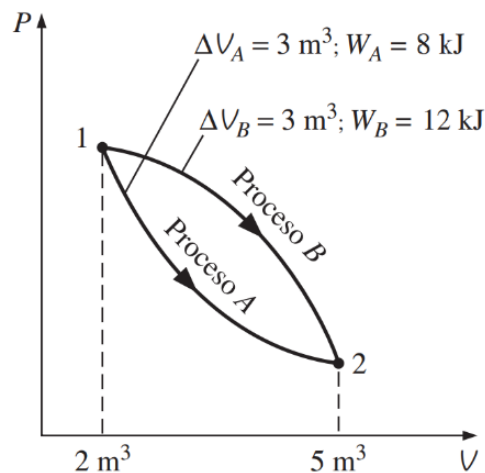
Las funciones de la trayectoria son diferenciales inexactas que se denotan por el símbolo δ . Así, una cantidad diferencial de calor o trabajo se representa mediante δQ o δW , respectivamente, en lugar de dQ o dW . Sin embargo, las propiedades son **funciones de estado** (es decir, sólo dependen del estado y no de cómo un sistema llega a ese estado) y son **diferenciales exactas** designadas por el símbolo d . Un pequeño cambio de volumen, por ejemplo, se representa por dV , y el cambio de volumen total durante un proceso entre los estados 1 y 2 es:

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1 = \Delta V \dots \text{ec. (3.17)}$$

Es decir, el cambio de volumen entre los procesos 1 y 2 es siempre el volumen en el estado 2 menos el volumen en el estado 1, sin importar la trayectoria seguida (*Figura 3.5*). Sin embargo, el trabajo total realizado entre los procesos 1 y 2 es:

$$\int_1^2 \delta W = W_{12} \text{ (no } \Delta W) \dots \text{ec. (3.18)}$$

Figura 3.5: Diagrama P vs V , donde el calor y trabajo son función de la trayectoria.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

Es decir, el trabajo total se obtiene siguiendo la trayectoria del proceso y sumando las cantidades diferenciales de trabajo (δW) efectuadas a lo largo del trayecto. La integral de δW no es $W_2 - W_1$ (es decir, el trabajo en el estado 2 menos el del estado 1), lo cual carecería de sentido puesto que el trabajo no es una propiedad y los sistemas no poseen trabajo en un estado.

3.2.3.1. Trabajo eléctrico

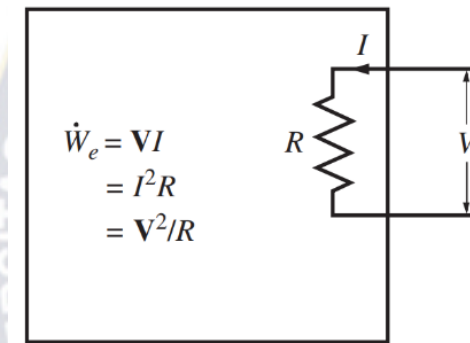
Se señaló que los electrones que cruzan la frontera del sistema realizan trabajo eléctrico sobre éste. En un campo eléctrico, los electrones de un alambre se mueven por el efecto de fuerzas electromotrices, por lo tanto, realizan trabajo. Cuando N coulombs de carga eléctrica se mueven a través de una diferencia de potencial V , el trabajo eléctrico realizado es:

$$W_e = V * N \dots \text{ec. (3.19)}$$

El cual se expresa también en forma de tasa como:

$$\dot{W}_e = V * I \text{ [W]} \dots \text{ec. (3.20)}$$

Figura 3.6: Potencia eléctrica en términos de RIV.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

Donde \dot{W}_e es la **potencia eléctrica** e I es el número de cargas eléctricas que fluyen por unidad de tiempo, es decir, la corriente (Figura 3.6). En general, tanto V como I varían con el tiempo y el trabajo eléctrico realizado durante un intervalo de tiempo Δt se expresa como:

$$\dot{W}_e = \int_1^2 V * I dt \text{ [kJ]} \dots \text{ec. (3.21)}$$

Si tanto V como I permanecen constantes durante el intervalo de tiempo Δt , la ecuación se reduce a:

$$W_e = V * I * \Delta t \text{ [kJ]} \dots \text{ec. (3.22)}$$

3.2.4. FORMAS MECÁNICAS DEL TRABAJO

Hay diversas formas de hacer trabajo, cada una relacionada de cierta manera con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia. En la mecánica elemental, el trabajo que realiza una fuerza constante F sobre un cuerpo que se desplaza una distancia s en la dirección de la fuerza se expresa como:

$$W = F * s \text{ [kJ]} \dots \text{ec. (3.23)}$$

Si la fuerza F no es constante, el trabajo realizado se obtiene al sumar (es decir, integrar) las cantidades diferenciales de trabajo:

$$W = \int_1^2 F ds \quad [kJ] \dots \text{ec. (3.24)}$$

Hay dos requisitos para que se presente una interacción de trabajo entre un sistema y el exterior:

- 1) Debe haber una fuerza que actúe sobre los límites
- 2) Estos deben moverse.

En muchos problemas termodinámicos el trabajo mecánico es la única forma de trabajo, y se relaciona con el movimiento de la frontera de un sistema o el del propio sistema como un todo. A continuación, se analizan algunas formas comunes de trabajo mecánico.

3.2.4.1. Trabajo de flecha

La transmisión de energía mediante un eje rotatorio (flecha) es una práctica muy común en la ingeniería. Con frecuencia el momento de torsión T aplicado al eje es constante, lo cual significa que la fuerza F aplicada también es constante. Para un determinado momento de torsión constante, el trabajo hecho durante n revoluciones se determina así: una fuerza F que actúa por medio de un brazo de momento r genera un momento de torsión T (Figura 3.7).

$$T = F * r \quad \rightarrow \quad F = \frac{T}{r} \dots \text{ec. (3.25)}$$

Esta fuerza actúa a lo largo de una distancia s , que se relaciona con el radio r mediante:

$$s = (2\pi r) * n \dots \text{ec. (3.26)}$$

El trabajo de flecha se determina a partir de:

$$W_{flecha} = Fs = \left(\frac{T}{r}\right) * (2\pi rn) = 2\pi nT \quad [kJ] \dots \text{ec. (3.27)}$$

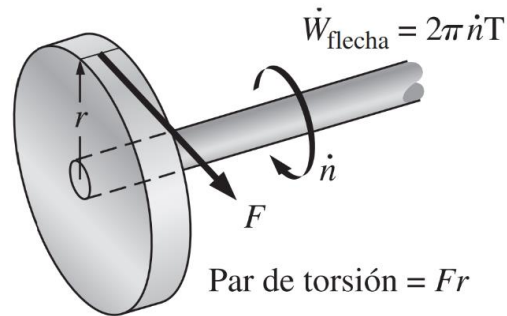
La potencia transmitida mediante la flecha es el trabajo de flecha por unidad de tiempo, que se puede expresar como:

$$\dot{W}_{flecha} = Fs = \left(\frac{T}{r}\right) * (2\pi rn) = 2\pi \dot{n}T \quad [kW] \dots \text{ec. (3.28)}$$

Dónde:

\dot{n} = Es el número de revoluciones por unidad de tiempo.

Figura 3.7: Trabajo de flecha es proporcional al momento de torsión aplicado.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

Hay muchas otras formas de trabajo mecánico. A continuación, se presentan algunas brevemente.

3.2.4.2. Formas no mecánicas del trabajo

Algunos modos de trabajo encontrados en la práctica son de naturaleza no mecánica, pero pueden tratarse de manera similar si se identifica una fuerza generalizada F que actúa en dirección de un desplazamiento generalizado x . Entonces, el trabajo relacionado con el desplazamiento diferencial bajo la influencia de esa fuerza se determina a partir de $\delta W = F dx$.

Algunos ejemplos de modos no mecánicos de trabajo son:

- El **trabajo de resorte**, todos sabemos que cuando se aplica una fuerza a un resorte, la longitud de éste cambia.
- El **trabajo eléctrico**, en el que la fuerza generalizada es el voltaje (el potencial eléctrico) y el desplazamiento generalizado es la carga eléctrica como se explicó antes.
- El **trabajo magnético**, donde la fuerza generalizada es la intensidad del campo magnético y el desplazamiento generalizado es el momento dipolar magnético.
- El **trabajo de polarización eléctrica** en el que la fuerza generalizada es la intensidad de campo eléctrico y el desplazamiento generalizado es la polarización del medio (la suma de los momentos dipolares eléctricos de rotación de las moléculas).

3.2.5. PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Hasta el momento se han considerado por separado varias formas de energía como el calor Q , el trabajo W y la energía total E , y no se ha hecho ningún intento para relacionarlas entre sí durante un proceso. *La primera ley de la termodinámica*, conocida también como el *principio de conservación de la energía*, brinda una base sólida para estudiar las relaciones entre las diversas formas de interacción de energía. A partir de observaciones experimentales, la primera ley de la termodinámica establece que “**La**

Energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma". Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso.

Una consecuencia importante de la primera ley es la existencia y definición de la propiedad *energía total E*. Considerando que el trabajo neto es el mismo para todos los procesos adiabáticos de un sistema cerrado entre dos estados determinados, el valor del trabajo neto debe depender únicamente de los estados iniciales y finales del sistema y por lo tanto debe corresponder al cambio en una propiedad del sistema; esta propiedad es la energía total. Observe que la primera ley no hace referencia al valor de la energía total de un sistema cerrado en un estado, tan sólo establece que el cambio de energía total durante un proceso adiabático debe ser igual al trabajo neto realizado.

3.2.5.1. Balance de energía

De acuerdo con el análisis anterior, el principio de conservación de la energía se expresa como: *el cambio neto (aumento o disminución) de la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso.* Es decir:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Energía total que} \\ \text{entra al sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{energía total que} \\ \text{sale del sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Cambio en la energía} \\ \text{total del sistema} \end{array} \right)$$
$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

Esta relación es más conocida como **balance de energía** y es aplicable a cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso. El uso exitoso de esta relación para resolver problemas de ingeniería depende de la comprensión de las distintas formas de energía y de reconocer los modos como ésta se transfiere.

3.2.5.2. Incremento de la energía de un sistema, $\Delta E_{\text{sistema}}$

Para determinar el cambio de energía de un sistema durante un proceso se requiere evaluar la energía del sistema al principio y al final del proceso y encontrar su diferencia. Es decir,

$$\left(\begin{array}{l} \text{Incremento} \\ \text{de la energía} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Energía en el} \\ \text{estado final} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Energía en el} \\ \text{estado inicial} \end{array} \right)$$

Observe que la energía es una propiedad y el valor de una propiedad no cambia a menos que cambie el estado del sistema. Por lo tanto, el cambio de energía de un sistema es cero si el estado no se modifica durante el proceso. También, es posible que exista energía en numerosas formas: interna (energía cinética de las moléculas, latente, química y nuclear), cinética, potencial, eléctrica y magnética, por lo que la suma de ellas constituye la **energía total E** de un sistema. En ausencia de efectos eléctricos, magnéticos y de tensión superficial (para sistemas simples compresibles), el cambio en la energía total del sistema durante un proceso es la suma de los cambios en sus energías interna, cinética y potencial, lo cual se expresa como:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP \dots \text{ec. (3.29)}$$

Dónde:

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) \dots \text{ec. (3.30)}$$

$$\Delta EC = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) \dots \text{ec. (3.31)}$$

$$\Delta EP = mg(z_2 - z_1) \dots \text{ec. (3.32)}$$

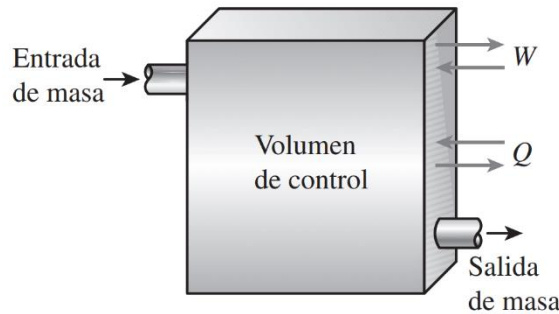
Cuando se especifican los estados inicial y final, los valores de las energías internas específicas u_1 y u_2 se determinan directamente de las tablas de propiedades o de las relaciones de propiedades termodinámicas.

3.2.5.3. Mecanismos de transferencia de energía, E_{entrada} y E_{salida}

La energía se puede transferir hacia o desde un sistema en tres formas: *calor*, *trabajo* y *flujo másico*. Las interacciones de energía se reconocen en las fronteras del sistema cuando lo cruzan, y representan la energía que gana o pierde un sistema durante un proceso. Las únicas dos formas de interacción de la energía relacionadas con una masa fija o sistema cerrado son las *transferencias de calor* y *de trabajo*.

1. **Transferencia de calor, Q:** La transferencia de calor hacia un sistema (ganancia de calor) incrementa la energía de las moléculas y por lo tanto la del sistema; asimismo, la transferencia de calor desde un sistema (pérdida de calor) la disminuye, ya que la energía transferida como calor viene de la energía de las moléculas del sistema.
2. **Transferencia de trabajo, W:** Una interacción de energía que no es causada por una diferencia de temperatura entre un sistema y el exterior es trabajo. Un émbolo ascendente, un eje rotatorio y un alambre eléctrico que cruzan la frontera del sistema se relacionan con interacciones de trabajo. La transferencia de trabajo a un sistema (es decir, el trabajo realizado sobre un sistema) incrementa la energía de éste, mientras que la transferencia de trabajo desde un sistema (es decir, el trabajo realizado por el sistema) la disminuye, puesto que la energía transferida como trabajo viene de la energía contenida en el sistema.
3. **Flujo másico, m:** El flujo másico que entra y sale del sistema funciona como un mecanismo adicional de transferencia de energía. Cuando entra masa a un sistema, la energía de éste aumenta debido a que la masa lleva consigo energía (de hecho, la masa es energía). De igual modo, cuando una cantidad de masa sale del sistema, la energía de éste disminuye porque la masa que sale saca algo de energía consigo. Por ejemplo, cuando cierta cantidad de agua caliente sale de un calentador y es reemplazada por agua fría en la misma cantidad, el contenido de energía del tanque de agua caliente (el volumen de control) disminuye como resultado de esta interacción de masa (*Figura 3.8*).

Figura 3.8: Volumen de control se cambia con el flujo de masa, calor y trabajo.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

Como la energía puede ser transferida en las formas de calor, trabajo y masa, y su transferencia neta es igual a la diferencia entre las cantidades transferidas hacia dentro y hacia fuera, el balance de energía se expresa de modo más explícito como:

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = (Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}) + (W_{\text{entrada}} - W_{\text{salida}}) + (E_{\text{masa,entrada}} - E_{\text{masa,salida}}) = \Delta E_{\text{sistema}} \dots \text{ec. (3.33)}$$

Donde los subíndices “entrada” y “salida” denotan cantidades que entran y salen del sistema, respectivamente. Los seis valores del lado derecho de la ecuación representan “cantidades” y, por lo tanto, son medidas *positivas*. La dirección de cualquier transferencia de energía se describe por los subíndices “entrada” y “salida”.

La transferencia de calor Q es cero para sistemas adiabáticos, la transferencia de trabajo W es cero para sistemas en los que no intervienen interacciones de trabajo, y el transporte de energía con E_{masa} es cero para sistemas sin flujo másico a través de su frontera (es decir, sistemas cerrados).

El balance de energía para un sistema que experimenta cualquier clase de proceso se expresa de manera compacta como:

$$\frac{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}{\text{Transferencia neta de energía mediante calor, trabajo y masa}} = \frac{\Delta E_{\text{sistema}}}{\text{Cambio de energía interna, cinética, potencial, etc}} \quad [kJ] \dots \text{ec. (3.34)}$$

o, en la forma de tasa, como:

$$\frac{\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}}}{\text{Transferencia neta de energía mediante calor, trabajo y masa}} = \frac{dE_{\text{sistema}}/dt}{\text{Cambio de energía interna, cinética, potencial, etc}} \quad [kW] \dots \text{ec. (3.35)}$$

Para tasas constantes, las cantidades totales durante un intervalo de tiempo Δt se relacionan con las cantidades por unidad de tiempo mediante:

$$Q = \dot{Q}\Delta t, \quad W = \dot{W}\Delta t, \quad \text{y} \quad \Delta E = (dE/dt)\Delta t \quad [kJ] \dots \text{ec. (3.36)}$$

El balance de energía se puede expresar **por unidad de masa** como:

$$e_{entrada} - e_{salida} = \Delta e_{sistema} \quad [kJ/kg] \quad \dots \text{ ec. (3.37)}$$

Que se obtiene dividiendo todas las cantidades de la ec. 3.34 entre la masa m del sistema. El balance de energía se puede expresar también en forma diferencial como:

$$\delta E_{entrada} - \delta E_{salida} = dE_{sistema} \quad \text{o} \quad \delta e_{entrada} - \delta e_{salida} = \delta e_{sistema} \quad \dots \text{ ec. (3.38)}$$

Para un sistema cerrado que experimenta un ciclo, los estados inicial y final son idénticos, por lo que $\Delta E_{sistema} = E_2 - E_1 = 0$. Entonces, el balance de energía para un ciclo se simplifica a $E_{entrada} - E_{salida} = 0$ o $E_{entrada} = E_{salida}$. Puesto que en un sistema cerrado no se tiene flujo másico en sus fronteras, el balance de energía para un ciclo se expresa en términos de interacciones de calor y de trabajo como:

$$W_{neto,salida} = Q_{neto,entrada} \quad \dots \text{ ec. (3.39)}$$

3.2.6. EFICIENCIA EN LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA

Eficiencia, es uno de los términos más usados en termodinámica, e indica qué tan bien se realiza un proceso de conversión o transferencia de energía. Asimismo, este término resulta uno de los que en general son mal usados en termodinámica, además de ser una fuente de malas interpretaciones. El desempeño o eficiencia se expresa en términos de la salida deseada y la entrada requerida, de la siguiente manera:

$$\text{Desempeño} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Salida requerida}} \quad \dots \text{ ec. (3.40)}$$

Un generador es un dispositivo que convierte energía mecánica en energía eléctrica, y su efectividad se caracteriza por la eficiencia del generador, que es la relación entre la salida de potencia eléctrica y la entrada de potencia mecánica. Los efectos de otros factores se incorporan mediante la definición de una eficiencia global para la central eléctrica, a partir de la relación entre la salida neta de potencia eléctrica y la tasa de entrada de energía del combustible. Es decir,

$$\eta_{global} = \eta_{combustion} * \eta_{termica} * \eta_{generador} = \frac{W_{neto,electrico}}{HHV * \dot{m}_{neto}} \quad \dots \text{ ec. (3.41)}$$

Las eficiencias globales están entre 26 y 30 % para motores de automóviles de gasolina, entre 34 y 40% para los de diésel y entre 40 y 60% para las grandes centrales eléctricas.

3.2.6.1. Eficiencia de dispositivos mecánicos y eléctricos

La transferencia de energía mecánica normalmente se lleva a cabo mediante una flecha rotatoria; de ahí que el trabajo mecánico se denomine *trabajo de flecha*. Una bomba o un ventilador reciben trabajo de flecha (comúnmente de un motor eléctrico) y lo transfieren al fluido como energía mecánica (menos las pérdidas por fricción). Por otro lado, una turbina convierte la energía mecánica de un fluido en trabajo de flecha. En ausencia de irreversibilidades como la fricción, la energía mecánica se

puede convertir por completo de una forma de energía mecánica a otra, y la **eficiencia mecánica** de un dispositivo o proceso se puede definir como:

$$\eta_{mecanica} = \frac{\text{Salida de energía mecánica}}{\text{Entrada de energía mecánica}} = \frac{E_{mecanica,salida}}{E_{mecanica,entrada}} = 1 - \frac{E_{mecanica,perdida}}{E_{mecanica,entrada}} \dots \text{ec. (3.42)}$$

Una eficiencia de conversión menor a 100% indica que la conversión es menos perfecta y han ocurrido algunas pérdidas durante ésta; una eficiencia mecánica de 97% indica que 3% del aporte de energía mecánica se convirtió en energía térmica como resultado del calentamiento por fricción, lo cual se manifiesta como un ligero aumento en la temperatura del fluido.

El grado de perfección del proceso de conversión entre el trabajo mecánico suministrado o extraído y la energía mecánica del fluido se expresa mediante la eficiencia de bomba y la eficiencia de turbina, definidas como:

$$\eta_{bomba} = \frac{\text{Incremento de energía mecánica del fluido}}{\text{Entrada de energía mecánica}} = \frac{\Delta \dot{E}_{mecanica,fluido}}{\dot{W}_{flecha,entrada}} = \frac{\dot{W}_{bomba,u}}{\dot{W}_{bomba}} \dots \text{ec. (3.43)}$$

Donde $\Delta \dot{E}_{mecanica,fluido} = \Delta \dot{E}_{mecanica,salida} - \Delta \dot{E}_{mecanica,entrada}$ es la tasa de incremento en la energía mecánica del fluido, el cual equivale a la **potencia de bombeo útil** $\dot{W}_{bomba,u}$ suministrada al fluido, y

$$\eta_{turbina} = \frac{\text{Salida de energía mecánica}}{\text{Disminución de energía mecánica del fluido}} = \frac{\dot{W}_{flecha,salida}}{|\dot{E}_{mecanica,fluido}|} = \frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{W}_{turbina,e}} \dots \text{ec. (3.44)}$$

Dónde:

$$|\dot{E}_{mecanica,fluido}| = \dot{E}_{mecanica,entrada} - \dot{E}_{mecanica,salida} \dots \text{ec. (3.45)}$$

Es la tasa de disminución en la energía mecánica del fluido, equivalente a la potencia mecánica extraída del fluido por la turbina $\dot{W}_{turbina,e}$, y se usa el signo de valor absoluto para evitar valores negativos en la eficiencia. En bombas o turbinas, una eficiencia de 100% indica conversión perfecta entre el trabajo de flecha y la energía mecánica del fluido, valor al que es posible aproximarse (pero nunca alcanzar) cuando se reducen los efectos de fricción.

La eficiencia mecánica no debe confundirse con la eficiencia del motor y la eficiencia del generador, definidas como:

Motor:

$$\eta_{motor} = \frac{\text{Salida de potencia mecánica}}{\text{Entrada de potencia eléctrica}} = \frac{\dot{W}_{flecha,salida}}{\dot{W}_{electrica,entrada}} \dots \text{ec. (3.46)}$$

Generador:

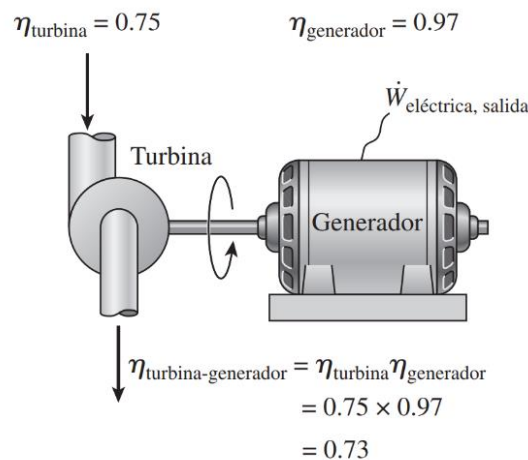
$$\eta_{generador} = \frac{\text{Salida de potencia eléctrica}}{\text{Entrada de potencia mecánica}} = \frac{\dot{W}_{electrica,salida}}{\dot{W}_{flecha,entrada}} \dots \text{ec. (3.47)}$$

Una bomba normalmente viene provista de un motor, y una turbina de un generador. Por lo tanto, normalmente el interés está en la **eficiencia combinada o global** de las combinaciones entre bomba-motor y turbina-generador (*Figura 3.9*), lo cual se define como:

$$\eta_{bomba-motor} = \eta_{bomba} * \eta_{motor} = \frac{W_{bomba,u}}{W_{electrica,entrada}} = \frac{\Delta \dot{E}_{mecanica,fluido}}{W_{electrica,entrada}} \dots \text{ec. (3.48)}$$

$$\eta_{turbina-generador} = \eta_{turbina} * \eta_{generador} = \frac{W_{electrica,salida}}{W_{turbina,e}} = \frac{W_{electrica,salida}}{|\Delta \dot{E}_{mecanica,fluido}|} \dots \text{ec. (3.49)}$$

Figura 3.9: Eficiencia global de un conjunto de turbina y generador.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

3.3. PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS PURAS

3.3.1. SUSTANCIA PURA

Una sustancia que tiene una composición química fija en cualquier parte se llama sustancia pura. El agua, el nitrógeno, el helio y el dióxido de carbono, por ejemplo, son sustancias puras. Una sustancia pura no tiene que estar conformada por un solo elemento o compuesto químico. Una mezcla de varios de éstos también puede ser una sustancia pura siempre y cuando la mezcla sea homogénea. El aire, por ejemplo, es una mezcla de varios gases, pero con frecuencia se considera como una sustancia pura porque tiene una composición química uniforme.

3.3.2. FASES DE UNA SUSTANCIA PURA

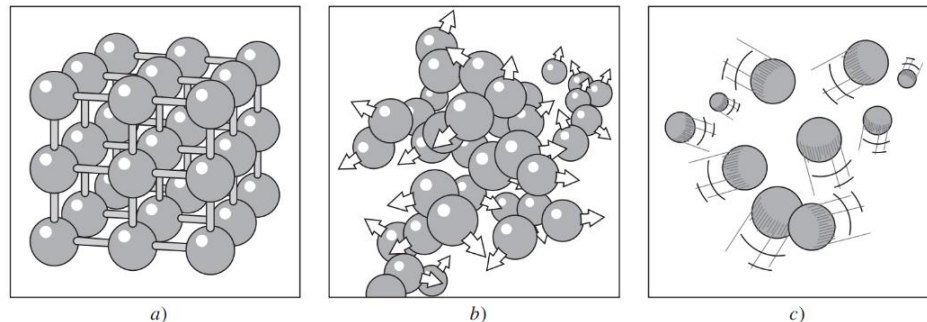
Por experiencia se sabe que las sustancias existen en fases diferentes. A temperatura y presión ambiental el cobre es un sólido, el mercurio un líquido y el nitrógeno un gas, pero en condiciones distintas, cada uno podría aparecer en fases diferentes. Aunque son tres las principales —sólida, líquida y gaseosa—, una sustancia puede tener varias fases dentro de la principal, cada una con distinta estructura molecular. Por ejemplo, el carbono existe como grafito o diamante en la fase sólida, el helio tiene dos fases

líquidas y el hierro tres fases sólidas. A presiones altas, el hielo existe en siete fases diferentes. Una fase tiene una configuración molecular distinta, es homogénea en todas partes y está separada de las demás fases por superficies frontera de fácil identificación.

3.3.3. PROCESOS DE CAMBIO DE FASE EN SUSTANCIAS PURAS

Hay muchas situaciones prácticas donde dos fases de una sustancia pura coexisten en equilibrio. Algunos ejemplos son: el agua existe como una mezcla de líquido y vapor en la caldera y en el condensador de una termoeléctrica, y el refrigerante pasa de líquido a vapor en el congelador de un refrigerador. Aunque muchos consideran al congelamiento del agua en las tuberías subterráneas como el proceso de cambio de fase más importante, la atención para esta sección se centra en la fase líquida y de vapor, así como en su mezcla.

Figura 3.10: Disposición de los átomos en diferentes fases.



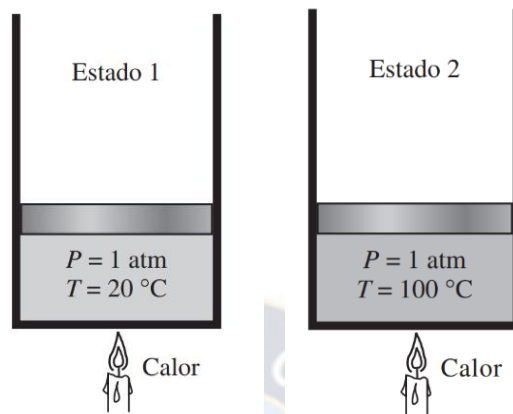
- a) Las moléculas están en posiciones relativamente fijas y un sólido,
 b) Grupos de moléculas se apartan entre sí en la fase líquida y
 c) Las moléculas se mueven al azar en la fase gaseosa.

Fuente: Boles y Çengel (2011).

3.3.3.1. Líquido comprimido y líquido saturado

Considere un dispositivo de cilindro-émbolo que contiene agua líquida a 20 °C y 1 atm de presión (*Estado 1, Figura 3.11*). En estas condiciones el agua existe en fase líquida y se denomina **líquido comprimido** o **líquido subenfriado**, lo cual significa que no está a punto de evaporarse. Se transfiere calor al agua hasta aumentar su temperatura a, por ejemplo, 40 °C. A medida que aumenta la temperatura, el agua líquida se expande un poco y por consiguiente aumenta su volumen específico. Entonces, debido a esta expansión el émbolo sube ligeramente. La presión en el cilindro permanece constante en 1 [atm] durante este proceso porque depende de la presión barométrica externa y el peso del émbolo, que son constantes. El agua es aún un líquido comprimido en este estado puesto que no ha comenzado a evaporarse.

Figura 3.11: Líquido comprimido (Estado 1) y Líquido saturado (Estado 2).



Fuente: Boles y Çengel (2011).

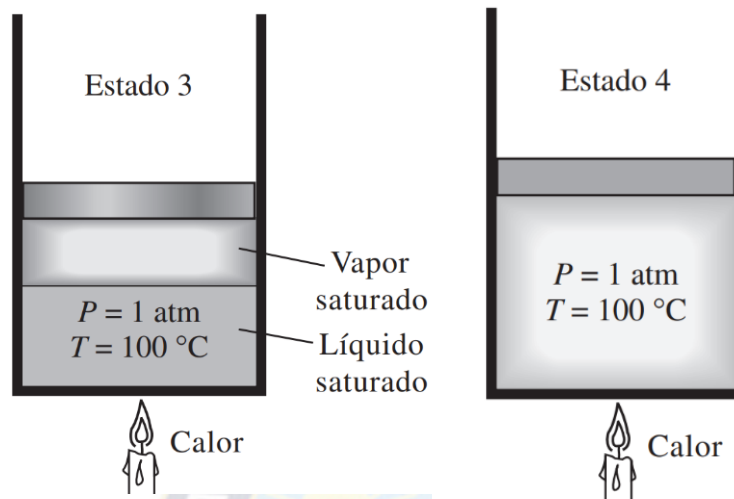
Conforme se transfiere más calor, la temperatura aumenta hasta alcanzar 100 °C (Estado 2, Figura 3.11), punto en que el agua todavía permanece líquida, pero cualquier adición de calor hace que se vaporice algo de agua; es decir, está a punto de tener lugar un proceso de cambio de fase de líquido a vapor. Un líquido que está a punto de evaporarse se llama **líquido saturado**; así, el Estado 2 corresponde al de un líquido saturado.

3.3.3.2. Vapor saturado y vapor sobrecalentado

Una vez que empieza la ebullición, el aumento de temperatura se detiene hasta que se evapora todo el líquido. Es decir, si la presión se mantiene constante, durante el proceso de cambio de fase la temperatura también lo hará. Es fácil comprobar lo anterior al colocar un termómetro en agua pura que hierve sobre una estufa. A nivel del mar ($P = 1 \text{ atm}$), el termómetro siempre indicará 100 °C si la cacerola está tapada o no con una tapa ligera.

Casi a la mitad de la línea de evaporación (Estado 3, Figura 3.12), el cilindro contiene cantidades iguales de líquido y vapor. Conforme continúa la transferencia de calor, el proceso de evaporación continuará hasta evaporarse la última gota de líquido (Estado 4, Figura 3.12). En ese punto el cilindro está lleno de vapor, el cual se halla en el borde de la fase líquida. Cualquier cantidad de calor que pierda este vapor hará que se condense (cambio de fase de vapor a líquido). Un vapor que está a punto de condensarse se llama **vapor saturado**; por lo tanto, el estado 4 es un estado de vapor saturado, y una sustancia entre los estados 2 y 4 se conoce como vapor húmedo o **una mezcla saturada de líquido-vapor**, debido a que en estos estados las *fases líquida y vapor coexisten en equilibrio*.

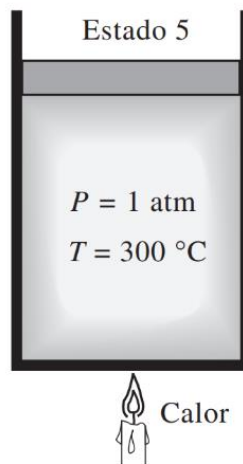
Figura 3.12: Mezcla saturada de líquido (Estado 3) y Vapor saturado (Estado 4).



Fuente: Boles y Çengel (2011).

Una vez completado, el proceso de cambio de fase termina y se alcanza una región de una sola fase (esta vez vapor). En este punto, transferir más calor da como resultado un aumento de temperatura y de volumen específico (Figura 3.13). En el estado 5 la temperatura del vapor es, por ejemplo, $300 \text{ }^\circ\text{C}$; si se transfiere algo de calor del vapor, la temperatura descendería un poco pero no habría condensación siempre que la temperatura permanezca por encima de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (para $P = 1 \text{ atm}$). Un vapor que no está a punto de condensarse (es decir, no es vapor saturado) se denomina vapor sobrecalentado; por lo tanto, el agua en el estado 5 es un vapor sobrecalentado.

Figura 3.13: Estado 5 – Vapor sobrecalentado.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

3.3.3.3. Temperatura de saturación y presión de saturación

Quizá no sea ninguna sorpresa saber que el agua comienza a hervir a 100 °C; sin embargo, en sentido estricto, decir “*el agua hierve a 100 °C*” es incorrecto. El enunciado correcto es “*el agua hierve a 100 °C a 1 [atm] de presión*”. En el ejemplo anterior, la única razón por la que el agua comenzó a hervir a 100 °C fue porque la presión se mantuvo constante a 1 [atm] (101.325 kPa). Si la presión dentro del cilindro se elevara a 500 [kPa] añadiendo pesas en la parte superior del émbolo, el agua empezaría a hervir a 151.8 °C. Es decir, *la temperatura a la cual comienza a hervir el agua depende de la presión; en consecuencia, si la presión es constante, sucede lo mismo con la temperatura de ebullición*.

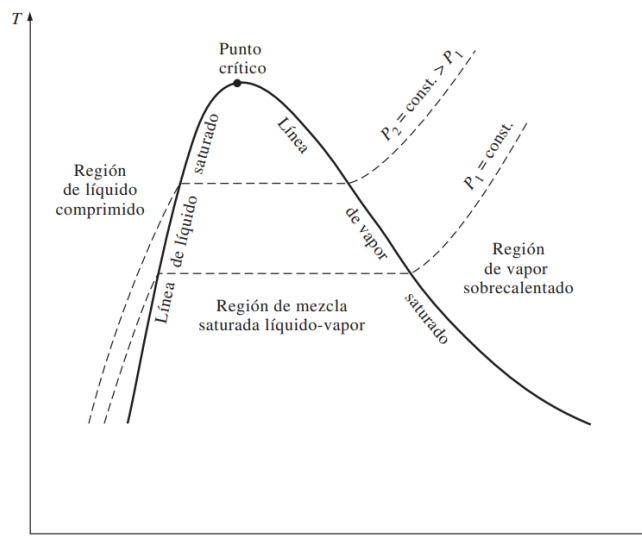
3.3.4. DIAGRAMAS DE PROPIEDADES PARA PROCESOS DE CAMBIO DE FASE

Las variaciones que experimentan las propiedades durante los procesos de cambio de fase se comprenden mejor con la ayuda de diagramas de propiedades. A continuación, se construyen y analizan los diagramas $T-v$, $P-v$ y $P-T$ para sustancias puras.

3.3.4.1. Diagrama $T-v$

El proceso de cambio de fase del agua a una presión de 1 [atm] se describió con detalle en la última sección y en la *Figura 3.14* se representó mediante un diagrama $T-v$. Ahora se repite este proceso a diferentes presiones para elaborar el diagrama $T-v$.

Figura 3.14: *Diagrama $T-v$ de una sustancia pura.*

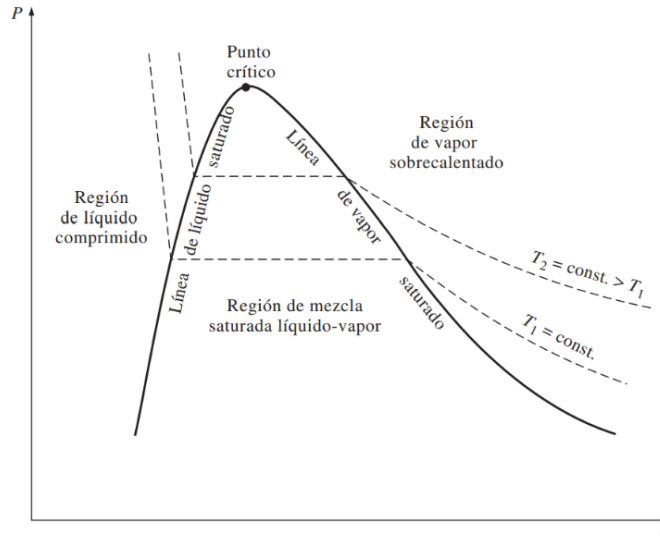


Fuente: Boles y Çengel (2011).

3.3.4.2. Diagrama $P-v$

La forma general del diagrama $P-v$ de una sustancia pura es similar a la del diagrama $T-v$, pero líneas de T constante en este diagrama presentan una tendencia hacia abajo, como se ilustra en la *Figura 3.15*.

Figura 3.15: Diagrama $P-v$ de una sustancia pura.

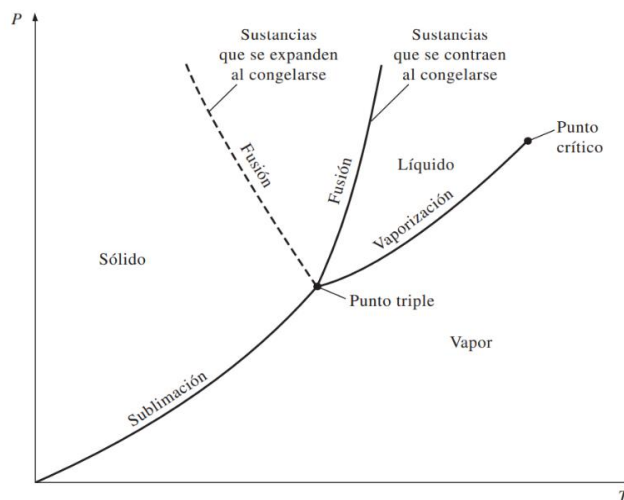


Fuente: Boles y Çengel (2011).

3.3.4.3. Diagrama P-T

En la *Figura 3.16* se ilustra el diagrama P-T de una sustancia pura, el cual se conoce como **diagrama de fases** porque las tres fases están separadas entre sí por tres líneas: la de sublimación separa las regiones sólidas y de vapor, la de evaporación divide las regiones líquidas y de vapor, y la de fusión separa las regiones sólida y líquida. Estas tres líneas convergen en el punto triple, donde las tres fases coexisten en equilibrio. La línea de evaporación finaliza en el punto crítico porque por encima de este no es posible distinguir las fases líquida y de vapor. Las sustancias que se expanden y contraen al congelarse difieren sólo en la línea de fusión en el diagrama P-T.

Figura 3.16: Diagrama $P-T$ de sustancias puras.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

3.3.5. TABLAS DE PROPIEDADES

Para la mayor parte de las sustancias, las relaciones entre propiedades termodinámicas son demasiado complejas para expresarse por medio de ecuaciones simples; por lo tanto, las propiedades suelen presentarse en forma de tablas. Algunas propiedades termodinámicas se miden con facilidad, pero otras no y deben calcularse a través de las relaciones que involucren propiedades medibles. Los resultados de estas mediciones y cálculos se presentan en tablas con un formato conveniente. En el siguiente análisis se utilizan tablas de vapor de agua para mostrar el uso de tablas de propiedades termodinámicas. Para otras sustancias, las tablas de propiedades se utilizan de la misma manera.

3.3.5.1. Entalpía: una propiedad de combinación

Para simplificar y por conveniencia, esta combinación se define como una nueva propiedad, entalpía, la cual se representa mediante el símbolo h :

$$h = u + Pv \quad [kJ/kg] \dots \text{ec. (3.50)}$$

o bien,

$$H = U + PV \quad [kJ] \dots \text{ec. (3.51)}$$

Tanto la entalpía total H , como la entalpía específica h , se indican simplemente como entalpía, ya que el contexto aclarará de cuál se habla. Observe que las ecuaciones anteriores son dimensionalmente homogéneas, es decir, la unidad del producto presión-volumen difiere de la unidad de la energía interna tal vez en un solo factor. En algunas tablas no se incluye la energía interna u , pero se determina a partir de $u = h - Pv$.

3.3.5.2. Mezcla saturada de líquido-vapor

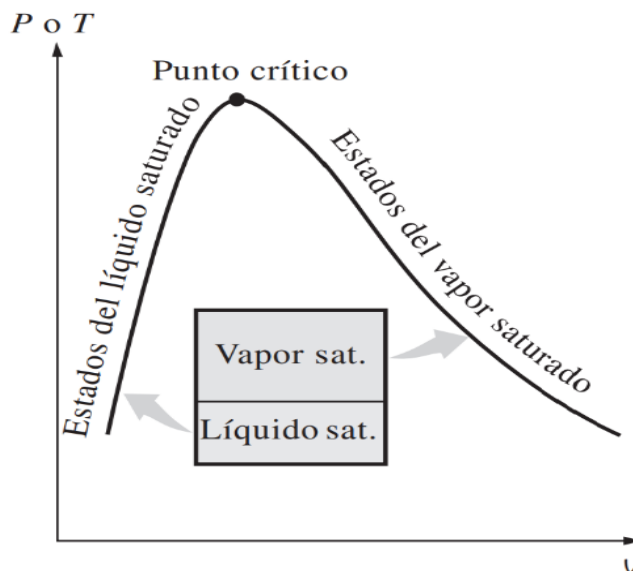
Durante un proceso de evaporación, una sustancia existe como una parte líquida y otra de vapor, es decir, es una mezcla de líquido y vapor saturados (*Figura 3.17*). Para analizar esta mezcla (vapor húmedo) de manera apropiada, es necesario conocer en qué proporciones se hallan dentro de la mezcla las fases líquidas y de vapor. Esto se consigue definiendo una nueva propiedad llamada la **calidad** o **título** x como la razón entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla:

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}} \dots \text{ec. (3.52)}$$

Dónde:

$$m_{\text{total}} = m_{\text{liquido}} + m_{\text{vapor}} = m_f + m_g \dots \text{ec. (3.53)}$$

Figura 3.17: Diagrama de fases líquida y de vapor mediante la calidad x .



Fuente: Boles y Çengel (2011).

La calidad tiene significado sólo para vapor húmedo, de ahí que para las regiones de líquido comprimido o de vapor sobrecalentado no lo tenga. Su valor está entre 0 y 1: la calidad de un sistema compuesto por líquido saturado es 0 (o 0 %) y la de uno compuesto por vapor saturado es 1 (o 100 %).

3.3.5.3. Vapor sobrecalentado

En la región situada a la derecha de la línea de vapor saturado y a temperaturas superiores a la temperatura en el punto crítico, una sustancia existe como vapor sobrecalentado. Como la región sobrecalentada es de una sola fase (únicamente la de vapor), la temperatura y la presión ya no son propiedades dependientes y pueden usarse de manera conveniente como dos propiedades independientes en las tablas.

En comparación con el vapor saturado, el sobrecalentado se caracteriza por:

- Presiones menores ($P < P_{\text{sat}}$ a una T dada).
- Temperaturas superiores ($T > T_{\text{sat}}$ a una P dada).
- Volúmenes específicos superiores ($v > v_g$ a una P o T dada).
- Energías internas superiores ($u > u_g$ a una P o T dada).
- Entalpías superiores ($h > h_g$ a una P o T dada).

3.3.5.4. Líquido comprimido

Es un estado en el que el líquido no está a punto de evaporarse y el agua solo existe en estado líquido. Cabe mencionar que su temperatura debe ser muy baja, ya que la temperatura es directamente proporcional a la presión, es decir a menor temperatura, menor es la presión, por lo tanto, podemos deducir que el líquido en esta fase se encuentra frío.

En general, un líquido comprimido está caracterizado por:

- Presiones superiores ($P > P_{sat}$ a una T dada).
- Temperaturas inferiores ($T < T_{sat}$ a una P dada).
- Volúmenes específicos inferiores ($v < v_f$ a una P o T dada).
- Energías internas inferiores ($u < u_f$ a una P o T dada).
- Entalpías inferiores ($h < h_f$ a una P o T dada).

3.4. CALORES ESPECÍFICOS

El calor específico se define como *la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia*. En general, esta energía depende de cómo se ejecute el proceso. En termodinámica, el interés se centra en dos clases de calores específicos: **calor específico a volumen constante** c_v y **calor específico a presión constante** c_p .

Desde un punto de vista físico, el calor específico a volumen constante c_v se puede considerar como *la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia cuando el volumen se mantiene constante*. La energía requerida para hacer lo mismo cuando se mantiene constante la presión es el calor específico a presión constante c_p , lo cual se ilustra en la *Figura 3.18*.

El principio de conservación de energía $e_{entrada} - e_{salida} = \Delta e_{sistema}$, para este proceso puede expresarse en forma diferencial como:

$$\delta e_{entrada} - \delta e_{salida} = du \dots ec. (3.54)$$

El lado izquierdo de esta ecuación representa la cantidad neta de energía transferida al sistema. A partir de la definición de c_v , esta energía debe ser igual a $c_v dT$, donde dT es el cambio diferencial de temperatura. Así,

$$c_v dt = du \quad a \text{ volumen constante} \dots ec. (3.55)$$

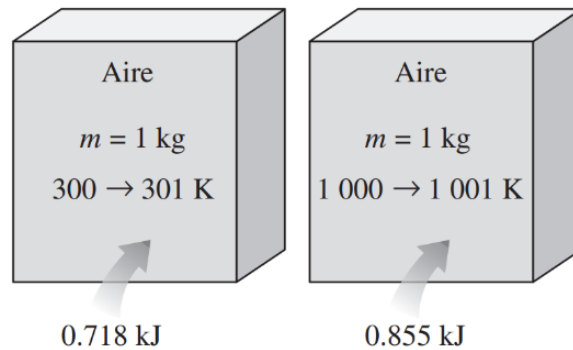
O bien,

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \dots ec. (3.56)$$

De manera similar, una expresión para el calor específico a presión constante c_p se obtiene al considerar un proceso de expansión o compresión a presión constante,

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \dots ec. (3.57)$$

Figura 3.18: Calor específico de una sustancia cambia con la temperatura.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

3.5. DISPOSITIVOS DE FLUJO ESTACIONARIO

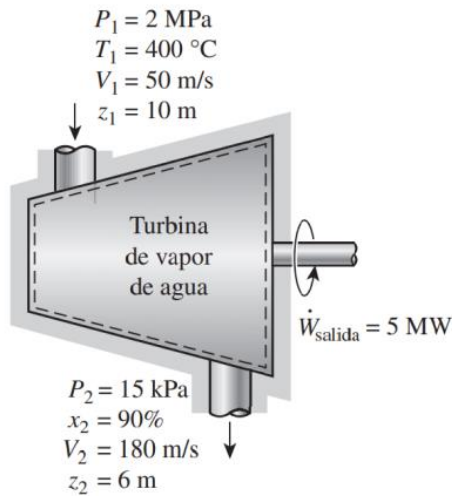
Muchos dispositivos de ingeniería operan en esencia bajo las mismas condiciones durante periodos largos. Por ejemplo, los componentes de una termoeléctrica (turbinas, compresores, intercambiadores de calor y bombas) operan sin parar durante meses antes de detener el sistema para mantenimiento (Figura 3.19); por lo tanto, pueden ser analizados de manera conveniente como dispositivos de flujo estacionario. En esta sección se describen algunos dispositivos comunes de flujo estacionario y se analizan algunos aspectos termodinámicos del flujo que pasa por ellos.

3.5.1. TURBINAS Y COMPRESORES

En las centrales eléctricas de vapor, gas o en hidroeléctricas, el dispositivo que impulsa al generador eléctrico es la turbina. A medida que el fluido pasa por ésta se hace trabajo contra los álabes, los cuales están unidos a la flecha, la cual a su vez gira y la turbina produce trabajo.

Note que las turbinas producen potencia mientras que los compresores, bombas y ventiladores requieren entrada de potencia. La transferencia de calor desde las turbinas por lo general es insignificante ($\dot{Q} \approx 0$) ya que normalmente están bien aisladas. La transferencia de calor es también insignificante para los compresores, a menos que haya enfriamiento intencional. Los cambios de energía potencial son insignificantes para todos estos dispositivos ($\Delta ep \approx 0$); mientras que las velocidades, con excepción de turbinas y ventiladores, son demasiado bajas para causar algún cambio importante en su energía cinética ($\Delta ec \approx 0$).

Figura 3.19: Balance másico en una turbina de vapor de agua.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

3.5.2. VÁLVULAS DE ESTRANGULAMIENTO

Las válvulas de estrangulamiento son dispositivos de diferentes tipos que restringen el flujo de un fluido provocando una caída relevante de presión. Algunos ejemplos comunes son válvulas ajustables ordinarias, tubos capilares y tapones porosos. A diferencia de las turbinas, producen una caída de presión sin implicar trabajo. La caída de presión en el fluido suele ir acompañada de una gran disminución de temperatura, por esa razón los dispositivos de estrangulamiento son de uso común en aplicaciones de refrigeración y acondicionamiento de aire.

Las válvulas de estrangulamiento son por lo regular dispositivos pequeños, y se puede suponer que el flujo por ellos es adiabático ($q \cong 0$) puesto que no hay suficiente tiempo ni área suficientemente grande para que ocurra alguna transferencia de calor efectiva. Tampoco se realiza trabajo ($w = 0$), y el cambio en la energía potencial, si tiene lugar, es muy pequeño ($\Delta ep \cong 0$). Aun cuando la velocidad de salida sea con frecuencia considerablemente mayor que la velocidad de entrada, en muchos casos el incremento de energía cinética es insignificante ($\Delta ec \cong 0$). Entonces la ecuación de conservación de la energía para este dispositivo de flujo estacionario de una sola corriente se reduce a

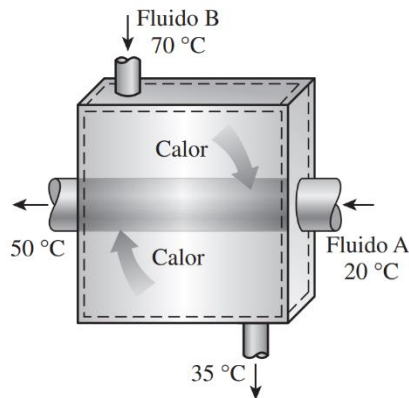
$$h_2 \cong h_1 \quad [\text{kJ/kg}] \quad \dots \text{ ec. (3.58)}$$

3.5.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR

Como su nombre indica, los intercambiadores de calor son dispositivos donde dos corrientes de fluido en movimiento intercambian calor sin mezclados. Los intercambiadores de calor se usan ampliamente en varias industrias y su diseño es variado.

La forma más simple de un intercambiador de calor es un intercambiador de calor de tubo doble (conocido también como de tubo y coraza), como se muestra en la *Figura 3.20* y que se compone de dos tubos concéntricos de diámetros distintos. Un fluido corre por el tubo interno mientras otro lo hace en el espacio anular entre ambos tubos. El calor se transfiere del fluido caliente al frío a través de la pared que los separa. Algunas veces el tubo interno tiene un par de vueltas dentro de la coraza para aumentar el área de transferencia de calor y, por consiguiente, la tasa de transferencia de calor. Las cámaras de mezclado se clasifican a veces como intercambiadores de calor de contacto directo.

Figura 3.20: Intercambiador de calor de tubo y coraza.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

El principio de conservación de la masa para un intercambiador de calor que opera de forma estacionaria requiere que la suma de los flujos másicos de entrada sea igual a la suma de los flujos másicos que salen. Este principio se puede expresar también como sigue: *en operación estacionaria, el flujo másico de cada corriente de fluido que fluye por un intercambiador de calor permanece constante.*

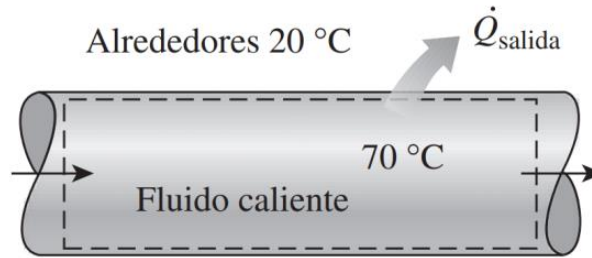
Los intercambiadores de calor comúnmente no tienen que ver con interacciones de trabajo ($w = 0$) y los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes ($\Delta ec \cong 0$, $\Delta ep \cong 0$) para cada corriente de fluido.

3.5.4. FLUJOS EN TUBERÍAS Y DUCTOS

El flujo (o la transferencia) de líquidos o gases en tuberías y ductos es de gran importancia en muchas aplicaciones de ingeniería. El flujo por una tubería o ducto comúnmente satisface las condiciones de flujo estacionario, de manera que se puede analizar como un proceso de flujo estacionario. Por supuesto, esto excluye los periodos transitorios de arranque y paro. La selección del volumen de control puede coincidir con la superficie interior de la porción de la tubería o ducto que se desea analizar.

En condiciones normales de operación, la cantidad de calor que gana o pierde el fluido puede ser muy significativa, en particular si la longitud de la tubería o ducto es grande.

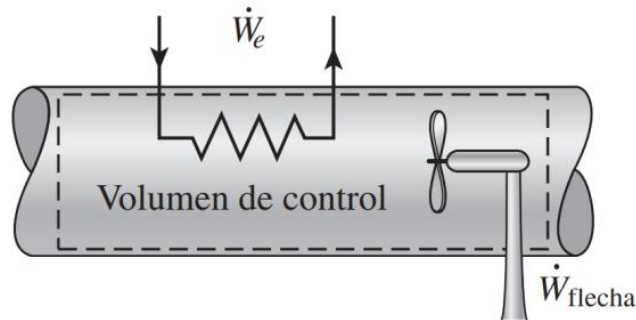
Figura 3.21: *Perdida de calor de un fluido en movimiento por la tubería.*



Fuente: Boles y Çengel (2011).

En algunas ocasiones es deseable la transferencia de calor y es el único propósito que tiene el flujo. Algunos ejemplos de esto son el agua que fluye por las tuberías del horno de una planta de energía, el refrigerante que lo hace por un congelador y el flujo en los intercambiadores de calor. Si en el volumen de control hay una sección de calentamiento (alambres eléctricos), un ventilador o una bomba (flecha), se deben considerar las interacciones de trabajo (*Figura 3.22*), de las que el trabajo del ventilador por lo general es pequeño y con frecuencia se ignora en el análisis de energía.

Figura 3.22: *Flujo por una tubería con calentamiento eléctrico.*



Fuente: Boles y Çengel (2011).

3.6. ENTROPÍA

Clausius comprendió en 1865 que él había descubierto una nueva propiedad termodinámica y decidió nombrarla entropía, la cual está designada por S y definida como:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right) \left[\frac{kJ}{K} \right] \dots \text{ec. (3.59)}$$

La entropía es una propiedad extensiva de un sistema y a veces es llamada entropía total, mientras que la entropía por unidad de masa s es una propiedad intensiva y tiene la unidad $[kJ/kg \cdot K]$. Generalmente, el término entropía es usado para referirse a ambas: a la total y a la de por unidad de masa, ya que el contexto normalmente esclarece de cuál se trata. El cambio de entropía de un sistema durante un proceso puede determinarse integrando la ec. 3.59 entre los estados iniciales y final:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) \left[\frac{kJ}{K} \right] \dots \text{ec. (3.60)}$$

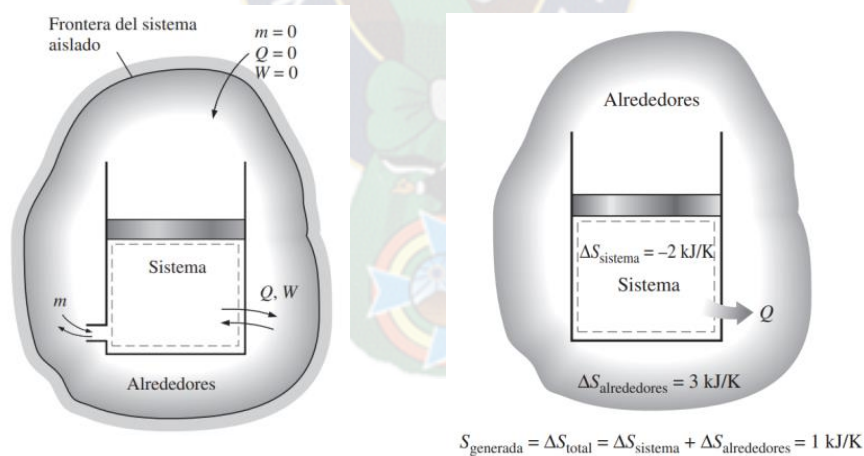
La entropía es una propiedad extensiva, por lo tanto, la entropía total de un sistema es igual a la suma de las entropías de las partes del sistema. Un sistema aislado puede estar compuesto de cualquier número de subsistemas. Por ejemplo, un sistema y sus alrededores constituyen un sistema aislado porque los dos pueden hallarse encerrados por una frontera arbitraria suficientemente grande a través de la cual no hay transferencia de calor, trabajo o masa. Por consiguiente, es posible considerar a un sistema y sus alrededores como dos subsistemas de un sistema aislado, y el cambio de entropía de éste durante un proceso resulta de la suma de los cambios de entropía del sistema y sus alrededores, la cual es igual a la generación de entropía porque un sistema aislado no involucra transferencia de entropía. Es decir,

$$S_{generada} = \Delta S_{total} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{alrededores} \geq 0 \dots \text{ec. (3.61)}$$

El principio de incremento de entropía no implica que la de un sistema no pueda disminuir. El cambio de entropía de un sistema puede ser negativo durante un proceso (*Figura 3.23*), pero la generación de entropía no. El principio de incremento de entropía puede resumirse como sigue:

$$S_{gen} \begin{cases} > 0 \text{ proceso irreversible} \\ = 0 \text{ proceso reversible} \\ < 0 \text{ proceso imposible} \end{cases}$$

Figura 3.23: Sistema entrópico y alrededores.



Fuente: Boles y Çengel (2011).

CAPÍTULO IV

PRODUCCIÓN Y DESARROLLO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA LAGUNA COLORADA – POTOSÍ

4.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad no se cuenta con sistemas para la generación de energía geotérmica en Bolivia, debido a que el país se encuentra en la etapa de recopilación de información y aprendizaje para el desarrollo de esta energía, por lo que en este capítulo se hará énfasis al estudio e investigaciones llevadas a cabo en el occidente boliviano específicamente en el departamento de Potosí cerca de la frontera con el país de Chile.

Una vez localizado el lugar donde se realizará el desarrollo de la energía geotérmica (alternativa seleccionada). Haremos la descripción de los informes presentados por ENDE en los que detalla todos los estudios llevados a cabo en la zona en cuanto a energía geotérmica se refiere, llegando a recopilar información útil para el presente proyecto *“DISEÑO DE LA INGENIERÍA CONCEPTUAL PARA EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA Y PLANTA DE ENERGÍA GEOTERMOELÉCTRICA EN SOL DE MAÑANA POTOSÍ”*

4.2. LUGAR DE EMPLAZAMIENTO DEL PROYECTO

Inicialmente el proyecto fue proyectado para una capacidad de 100 [MW] de potencia instalada para posteriormente generar energía eléctrica útil, a partir de recursos o yacimientos geotérmicos, el lugar de emplazamiento de la planta generadora se encuentra ubicada a una distancia aproximada de 20 [km] al sur de la laguna Colorada.

El área del proyecto estará ubicada en la región sur del altiplano boliviano (tierras altas), abarcando tres provincias del altiplano de Potosí como ser la provincia Sud Lipez, Nor Lipez y Baldivieso. El campo geotérmico se encuentra en su totalidad dentro la provincia Sud Lipez. El área propuesta para emplazamiento del proyecto se sitúa al sur del Salar de Uyuni y al este de la franja oeste de los Andes, entre los 22° y 23° de latitud sud y 67° y 68° de longitud oeste. El área del proyecto es accesible por tierra desde las ciudades de Oruro y Potosí a través de la Localidad de Uyuni.

La distancia desde Oruro es aproximadamente de 340 [km] y la distancia de Uyuni hasta el campo geotérmico es de 260 [km] en aproximación. El acceso al área del Proyecto desde la república de Chile es a través de una vía asfaltada Iquique – Calama - San Pedro de Atacama hasta el punto fronterizo en Cajones.

Figura 4.1: Ubicación geográfica de Bolivia en Sudamérica.



Fuente: UDAPE (2022).

Figura 4.2: Ubicación geográfica de Sol de Mañana en Potosí.



Fuente: Bnamericas (2018).

4.3. CAMPO SOL DE MAÑANA DE LAGUNA COLORADA COMO ALTERNATIVA EN GENERACIÓN GEOTÉRMICA¹³

En el lugar específico Campo Sol de Mañana de la Laguna Colorada se encuentra a una altura de 4.905 metros sobre el nivel del mar, a 12 Km del hito 78 de la frontera con la República de Chile, en el cantón Quetena, Provincia Sud Lípez del Departamento de Potosí – Bolivia, y a escasos 15 minutos del Hito Cajones, puesto fronterizo para el acceso a Chile, siendo la población más cercana San Pedro de Atacama, actualmente tienen grandes avances en estudios de generación de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos cuyos recursos fueron estudiados y analizados por distintas empresas como la Agencia de cooperación internacional del Japón (JICA) y West Japan Engineering Consultants Inc. (WJEC). Es así como se fomenta la ejecución del proyecto geotérmico de la Laguna Colorada.

La empresa estatal ENDE Corporación se encuentra a cargo del proyecto geotérmico de Laguna Colorada, el cual será emplazado en el campo Sol de Mañana – Potosí – Bolivia. La ejecución del proyecto de la central geotérmica estará conformada por 4 unidades de 25 [MW], completando un total de 100 [MW] de potencia instalada. En los siguientes puntos se detalla información del proyecto geotérmico establecido, por ENDE.

En Bolivia existen cinco pozos exploratorios geotérmicos (SM – 1 ~ SM – 5) en el sitio del Proyecto ubicado en el Yacimiento Geotérmico Sol de Mañana. Otro pozo exploratorio geotérmico (AP-1) se encuentra ubicado en la falda oeste del Cerro Apacheta, a unos 5 km al oeste del sitio del Proyecto. Las coordenadas y las cantidades de los pozos existentes se resumen en la *Tabla 4.1*.

Tabla 4.1: Resumen de los pozos exploratorios Sol de Mañana.

RUBROS DE ESTUDIO	CANTIDADES						
	Nro.	Ubicación		Elevación (m)	Profundidad (m)	Año	Realizado por
X		Y					
Pozos	SM-1	628743.58	7518885.60	4858.8	1178,5	1988	-
	SM-2	627892.12	7519428.50	4905.6	1486,5	1988-1989	
	SM-3	628596.10	7519536.07	4884.8	1406,0	1989	
	SM-4	630813.80	7518915.58	4840.5	1726,2	1989,1991	
	SM-5	627246.80	7519738.60	4903.5	1705,0	1992	
	AP-1	****	****	****	1602,0	1987-1988	
Estudio Geofísico	Estudio de resistividad eléctrica.					1986	ENDE
	Estudio de gravedad (260 puntos).					1986	ENDE
	Estudio MT (69 puntos) y análisis de inversión de inversión tridimensional.					2013	ENDE
Pruebas de Producción de Pozos	SM-1, SM-2, SM-3, SM-4, AP-1					1987-1990	UNDT
	SM-2, SM-5					1997	CD
	SM-1, SM-3, SM-2					2010-2013	CFE JICA

Fuente: JICA (2015).

¹³ ENDE (2015). Proyecto de construcción de la planta Geotérmica Laguna Colorada

Figura 4.3: Inspección de ENDE a los cabezales de pozos.



Fuente: *El Potosí* (2019).

4.4. ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOQUÍMICO¹⁴

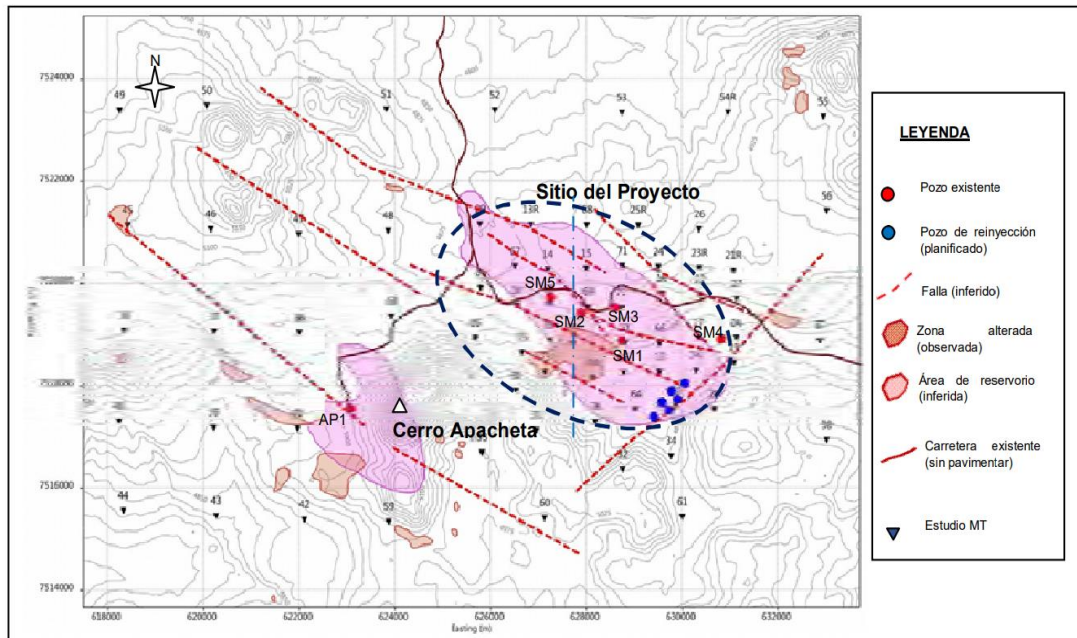
Basándose en JETRO (2008), se revisaron los resultados existentes del estudio geológico y geoquímico del área del proyecto. Además, aunque la reanálisis de los componentes químicos fue realizada por JICA (2013) por medio de pruebas de producción en los pozos exploratorios existentes, no se ve la diferencia con el resultado del análisis realizado el 2008.

Según los estudios geoquímicos, las características del fluido geotérmico en el Yacimiento Geotérmico Sol de Mañana son las siguientes:

- La mayor parte del fluido geotérmico puede originarse del agua meteórica, gana calor y su temperatura llega a ser 270 °C o más. El calor posiblemente se transfiere por el influjo del fluido de alta temperatura y/o la conducción térmica.
- Una fuente de calor posiblemente ocurre a una profundidad mayor a la de los 1.700 m desde el nivel del suelo, donde podría ubicarse el basamento de rocas sedimentarias.
- El sitio del Proyecto se considera un yacimiento geotérmico líquido dominante.
- La distribución del reservorio geotérmico parece limitarse al lado este debido a que la temperatura del SM- 4 es baja.

¹⁴ ENDE (2015). *Proyecto de construcción de la planta Geotérmica Laguna Colorada.*

Figura 4.4: Mapa de los pozos exploratorios y el estudio MT.



Fuente: ENDE (2015).

4.4.1. ESTUDIO GEOLÓGICO¹⁵

Los componentes geológicos del sitio del Proyecto son rocas piroclásticas del Neógeno divididas en cuatro capas, denominadas y en orden ascendente, la capa inferior de ignimbrita, la andesita, la capa superior de ignimbrita y la capa Cerro Apacheta. Se deduce que las rocas sedimentarias del Cretáceo yacen debajo de estas rocas piroclásticas.

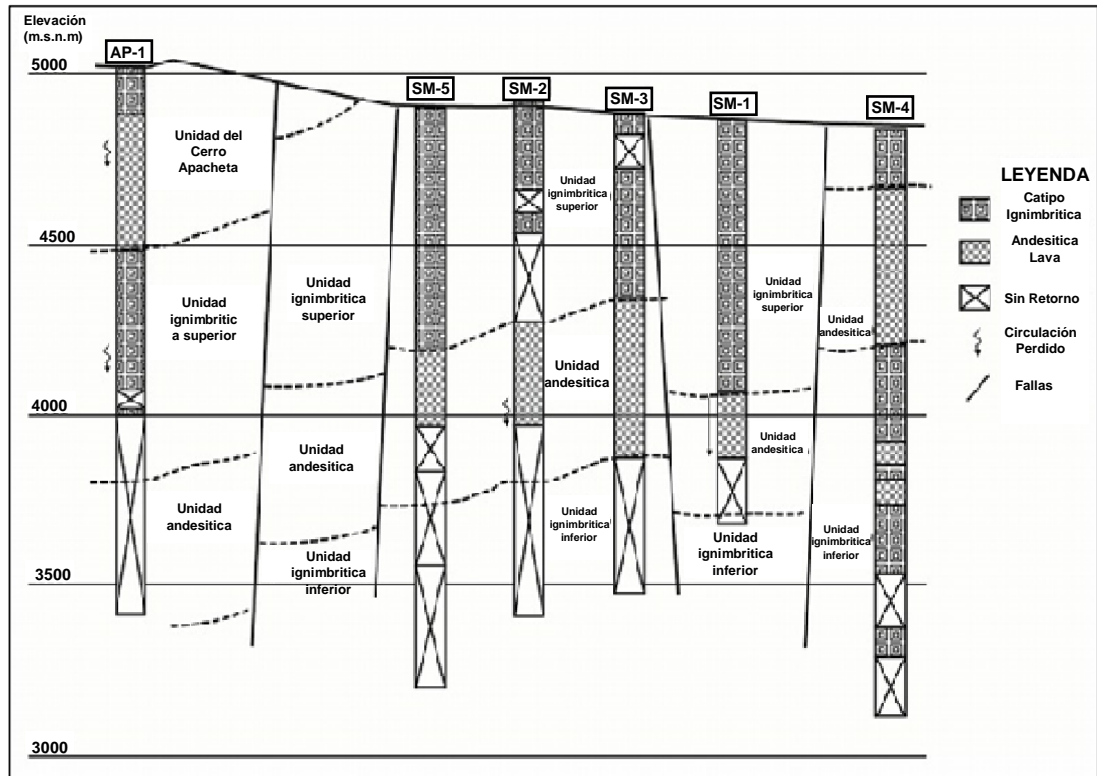
Las rocas piroclásticas se inclinan suavemente hacia el Oeste. Los principales conjuntos de fallas se extienden en dirección ONO – ESE y NE – SO hacia el Reservorio Geotérmico Sol de Mañana; particularmente, las fallas ONO – ESE son las predominantes. Es probable que estos sistemas de fallas controlen el flujo y la distribución del fluido geotérmico en cada Reservorio de Sol de Mañana y Cerro Apacheta (la falda oeste).

4.4.1.1. Estratigrafía

Hay cinco pozos exploratorios geotérmicos (SM-1 ~ SM-5) en el sitio del proyecto localizados en el Campo Geotérmico Sol de Mañana, tal como se muestra en la *Figura 4.5*. Otro pozo exploratorio geotérmico (AP-1) está localizado al pie del Cerro Apacheta, aproximadamente a 5 km del sitio del proyecto. Los componentes geológicos del sitio del Proyecto son rocas piroclásticas del Neogeno divididas en 4 capas, llamadas en orden ascendente: capa de ignimbrita baja, andesita, capa de ignimbrita superior y capa de Cerro Apacheta.

¹⁵ JICA (2015). Proyecto de construcción de la planta Geotérmica Laguna Colorada.

Figura 4.5: Columna de secciones geológicas de los pozos geotérmicos.

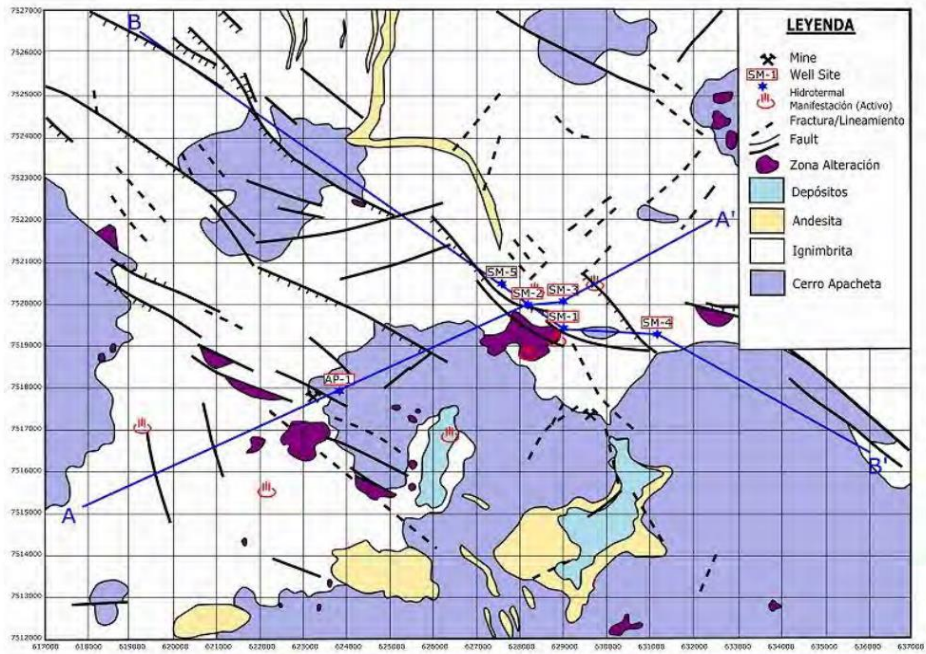


Fuente: JICA (2015).

4.4.1.2. Estructura Geológica

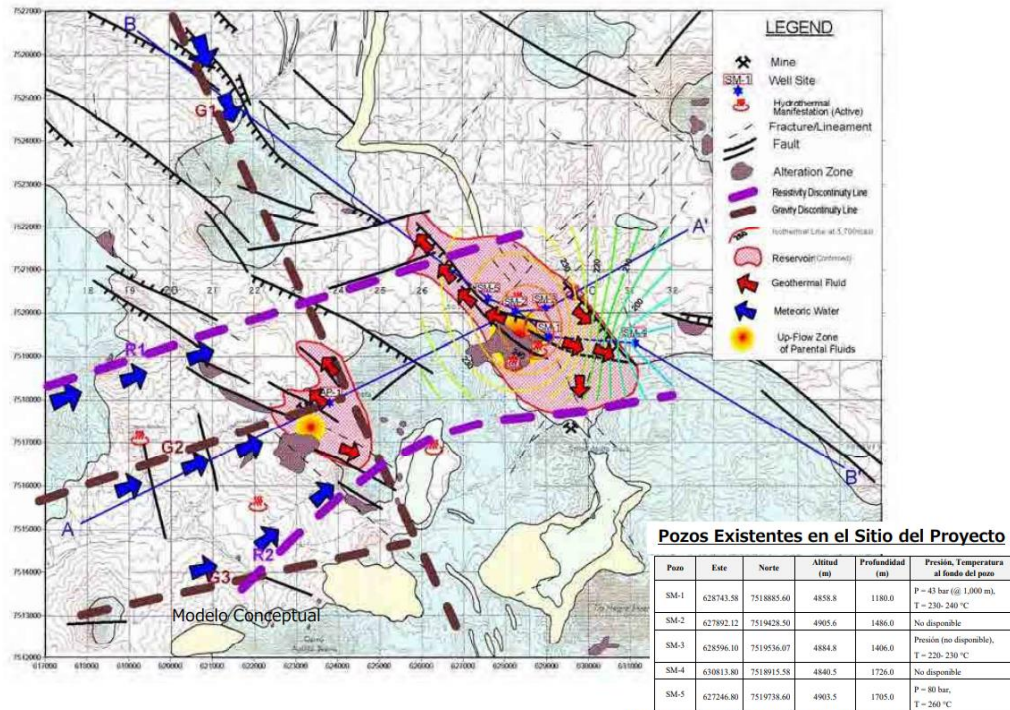
Las rocas piroclásticas se inclinan suavemente hacia el Oeste. El conjunto de fallas principales se extienden ONO–ESE y NE–SO en dirección hacia el Campo Geotérmico Sol de Mañana, principalmente las fallas ONO–ESE están dominadas tal como se muestra en la *Figura 4.6*. Estos sistemas de fallas muy probablemente controlan el flujo y la distribución del fluido geotérmico en los Campos de Sol de Mañana y Cerro Apacheta (el pie occidental). Un sistema de tres fallas consecutivas con dirección ONO–ESE es estimado en la parte central del sitio del proyecto. Estas fallas se consideran como fallas de tipo normal. El sistema de fallas NE–SO (incluyendo el lineamiento) se ha distribuido entre las fallas del sistema ONO–ESE. De acuerdo con la distancia en elevación del límite entre la capa de ignimbrita superior y la capa andesítica, se infiere una falla con dirección ONO que ocurre entre SM–1 y SM–3, y otra falla con dirección NW–SE se extiende entre SM–1 y SM–4.

Figura 4.6: Mapa Geológico del campo geotérmico de Sol de Mañana.



Fuente: JICA (2015).

Figura 4.7: Estructura geológica recopilada Sol de Mañana.



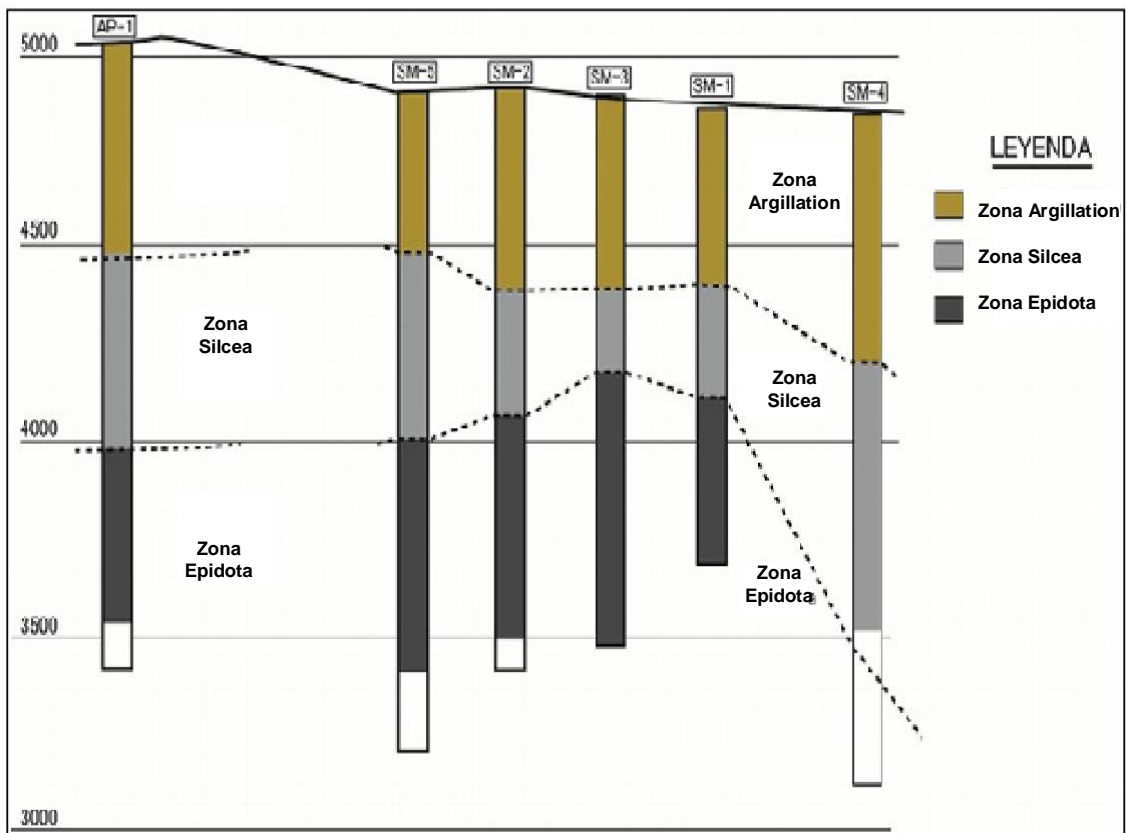
Fuente: RFP, Informe de Sol Mañana (ENEL, 1989)

Fuente: JICA (2015).

4.4.1.3. Zona de Alteración Hidrotermal

La cristalización de minerales de alteración hidrotermal puede ser un indicador de la estimación de temperatura en el subsuelo pasada o actual y una base estimada de la capa de rocas en la cubierta del reservorio geotérmico. Según los informes previos, existen tres zonas minerales en esta área de proyecto, tales como la zona arcillosa, la zona silíceo y la zona epidota (*Figura 4.8 y Cuadro 4.1*). En las rocas de seis pozos existentes, se observan minerales secundarios, tales como minerales de arcilla, illita, esmectita, clorita, zeolita, romontita, wairakita, calcita, pirita y epidota, y en general están alteradas en un grado alto o medio.

Figura 4.8: *Sección transversal de la alternación.*



Fuente: JICA (2015).

Cuadro 4.1: Resumen de los minerales de alteración hidrotermal.

Zona	Temperatura de Cristalización	Ocurrencia de Minerales alterados
Zona Arcillosa	<180°C	En general, a una profundidad menor a 500 [m], se han cristalizado los minerales de arcilla y los minerales mixtos de sílice – zeolita. Pero cerca del pozo SM-4, yacen a mayor profundidad.
Zona Silíceea	180°C a 220°C	Profundidad a la que yacen los minerales de sílice: - SM-1, SM-2 y SM-3: a una profundidad entre 700 [m] y alrededor de 800 [m]. -SM-5 y AP-1: hasta una profundidad de aproximadamente 1.000 [m] - SM-4: a una profundidad de 1.300 [m] o mayor
Zona Epidota	>200°C	Epidota, clorita, sílice y los minerales de alteración hidrotermal de alta temperatura (albita y wairakita) están distribuidos a una profundidad mayor que el fondo de los pozos geotérmicos que se han perforado en esta área.

Fuente: JICA (2015).

4.4.2. ESTUDIO GEOQUÍMICO

Se han colectado datos geoquímicos (tales como aguas termales, agua de manantiales, gases de fumarolas y vapor (agua caliente) de los pozos geotérmicos).

4.4.2.1. Características del Fluido de Reservorio

La clasificación de aguas termales, aguas de manantiales y aguas de pozos geotérmicos se muestran, en base a los principales iones disueltos en base a las características de cada fluido, en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2: Resumen de la clasificación en base a los lones disueltos.

Fluido	Clasificación	Característica
Agua Termal y de manantial	Tipo SO ₄ o tipo HCO ₃ (Baja concentración de Cl)	Las aguas termales, como, por ejemplo, Laguna Colorada, Cerro Lagunitas y el Salar de Chaliviri, tienen por lo general una concentración de Cl menor a la de las aguas termales de un pozo geotérmico.
Pozo de agua caliente	Tipo SO ₄ (acidez)	Se la considera como agua subterránea de poca profundidad o agua superficial que ha sido calentada por los vapores y gas de fumarolas.
Agua caliente proveniente de pozo geotérmico	Tipo Cl (neutro)	La concentración de Cl, luego de una separación de vapor de presión atmosférica, es de 6.500 – 9.500 mg/L (4.300 – 6.600 mg/kg en el reservorio). La concentración del componente disuelto de Cl es relativamente alta.

Fuente: JICA (2015).

4.4.2.2. Incrustación

Con respecto a la incrustación a partir del fluido geotérmico, se analizó una pequeña cantidad de escamas depositadas en las cercanías del cabezal del pozo durante las pasadas pruebas de producción, y se confirmó que las escamas contenían cloruro de sodio (NaCl) y calcita (CaCO₃). Sin embargo, en la prueba de producción (que duró hasta 3 meses) no se observó disminución en la cantidad de producción del fluido geotérmico. Por lo tanto, no se espera que la incrustación sea un problema grave.

Además, la formación de escamas de sílice a partir de las aguas calientes de reinyección a menudo causa problemas, tales como la reducción de la capacidad de absorción de los pozos de reinyección. Considerando la saturación de la sílica amorfa en el proyecto y asumiendo que la temperatura es de 260°C, y si la temperatura del agua de reinyección se mantiene en 162°C o más, puede considerarse que no se generará incrustación por sílice. Asimismo, cuando la temperatura es de 250°C, y si la temperatura del agua de reinyección se mantiene en 150°C o más, se considera que se puede evitar la formación de escamas de sílice.

Figura 4.9: Estado físico de Cabezal de pozo.



Fuente: JICA (2015).

4.5. DATOS DE PERFORACIÓN DE LOS POZOS EXISTENTES

Tal como se mencionó anteriormente, existen cinco pozos en el sitio del proyecto. A continuación, se describen los resultados de la revisión de los datos de los pozos de perforación en los informes existentes y la encuesta por medio de entrevistas.

Tabla 4.2: Resumen perforación pozos existentes.

RUBROS	NOMBRE DEL POZO				
	SM-1	SM-2	SM-3	SM-4	SM-5
Profundidad de perforación	1178,5 m	1486,5 m	1406,0 m	1762,2 m	1705,0
Periodo de trabajo	Sep/09/1988 - Nov/15/1988 (70 días)	Dic/19/1988 - Feb/17/1989 (61 días)	Abr/21/1989 - oct/05/1989 (72 días)	Nov/01/1989 - Dic/24/1989 (53 días)	Abr/03/1992 - Nov/08/1992 (70 días)
Diámetro de fondo de pozo	8 ½" (culminación de pozo abierto)	8 ½" (culminación de pozo abierto)	8 ½" (culminación de pozo abierto)	7" tubería de revestimiento (tubería con raja o hendedura aparte)	8 ½" (culminación de pozo abierto)
Tipo de pozo	Pozo vertical	Pozo vertical	Pozo vertical	Pozo vertical	Pozo vertical
Circulación perdida	Se desconoce los detalles	Se desconoce los detalles	Se desconoce los detalles	Se desconoce los detalles	Se desconoce los detalles
Problema hacia abajo	Extubación de la tubería de revestimiento	Reserva para el almacenamiento de agua (bajo investigación)	Se desconoce los detalles	Evidencia de historia de pesca o salvamento (Se desconoce los detalles)	Se desconoce los detalles
Anotación especial	Luego de perforar la primera sección, el trabajo de la tubería de revestimiento tomo una semana (parece tres veces el trabajo extubación)	Nada en particular	Nada en particular	Nada en particular	Nada en particular
Producción	Si	Si	Si	Si	Si

Fuente: JICA (2015).

4.6. PRUEBAS DE PRODUCCIÓN (PRUEBAS DE LOS POZOS)

Las pruebas de producción en el sitio del Proyecto se llevaron a cabo tres veces: Las primeras, entre 1987 – 1990; las segundas, entre mayo – agosto 1997, y las terceras, entre diciembre 2012 – abril 2013.

4.6.1. INSPECCIÓN VISUAL DE CABEZALES

El resultado de la inspección se resume en el informe "Estado físico de los cabezales de Pozos en el Campo Geotérmico de Sol de Mañana, Bolivia (mayo de 2011)".

- La temperatura de operación de la válvula de purga en el pozo SM-2 es de 121 °C, lo que la hace insuficiente para presiones de saturación de 10 [bar] en donde la temperatura de saturación es de más o menos 180 °C. Fugas leves fueron encontradas en las válvulas principales (principal, válvula lateral) del pozo SM-5. Las fugas no causarían ningún problema durante las pruebas de producción. Sin embargo, las válvulas no se pueden reutilizar en otros pozos.
- La presión en la válvula de purga en el pozo SM-3 fue de 2 [bar], Este valor parece ser erróneo, ya que se prevé que sea de alrededor de 20 [bar]. Después de abrir la válvula, la mezcla de salmuera y de gas (alrededor de 30 °C) hizo que fluyera el pozo. Dado que se prevé el nivel de agua se encuentre sobre la profundidad de los 400 metros, lo anterior sugiere que no había comunicación de presión entre el interior de la válvula de purga y el interior del pozo. Sin embargo, esto no causaría ningún problema durante la prueba de producción.

4.6.2. DETALLE DE LA PRUEBAS DE PRODUCCION¹⁶

(1) SM-1

- Según la prueba de producción llevada a cabo entre diciembre del 2012 y enero del 2013, la tasa o velocidad de flujo total máxima fue aproximadamente de 285 [ton/h] y la tasa o velocidad de flujo de vapor máxima fue de alrededor de 50 [ton/h]. La entalpía específica máxima del fluido de producción fue de aproximadamente 1.150 [kJ/kg]. Estos valores fueron casi iguales a los resultados de la prueba de producción anterior de hace unos 25 años.
- La pared del pozo exploratorio es estable, y este pozo mantiene una alta capacidad de productividad.
- Los valores permeability – thickness product [kh] alrededor de SM – 1 eran muy elevados, estimándose en 100 darcy – m.
- La temperatura máxima fue de 242°C (diciembre del 2012), la cual es casi igual a la temperatura medida 25 años atrás (aproximadamente 250°C).

(2) SM-2

- Según la prueba de producción llevada a cabo en abril del 2013, la tasa o velocidad de flujo total máxima fue aproximadamente de 280 [ton/h] y la tasa o velocidad de flujo de vapor máxima fue de alrededor de 54 [ton/h]. La entalpía específica máxima del fluido de producción fue de aproximadamente 1.150 [kJ/kg]. Estos valores fueron casi iguales a los resultados de la prueba de producción anterior de hace unos 15 años.

¹⁶ JICA (2013). *Proyecto preparatorio para el Proyecto de Construcción de la Central geotérmica Laguna Colorada.*

- La pared del pozo es estable y este pozo mantiene alta capacidad de producción.
- Los valores kh alrededor de SM – 2 eran muy elevados, estimándose en 100 [darcy–m]. Este valor es igual al de los resultados obtenidos en las pruebas de producción realizadas en el año de 1997.
- Según la prueba al pozo realizada en marzo del 2013, la temperatura alrededor de SM – 2 fue de 236°C. Sin embargo, la temperatura relativamente baja podría haber sido causada por el agua inyectada. La temperatura debe ser igual a la temperatura medida hace unos 15 años (243°C).

Figura 4.10: *Cabezal de pozo SM-1 – Sol de Mañana.*



Fuente: *Blogger (2015).*

Figura 4.11: *Cabezal de pozo SM-2 – Sol de Mañana.*

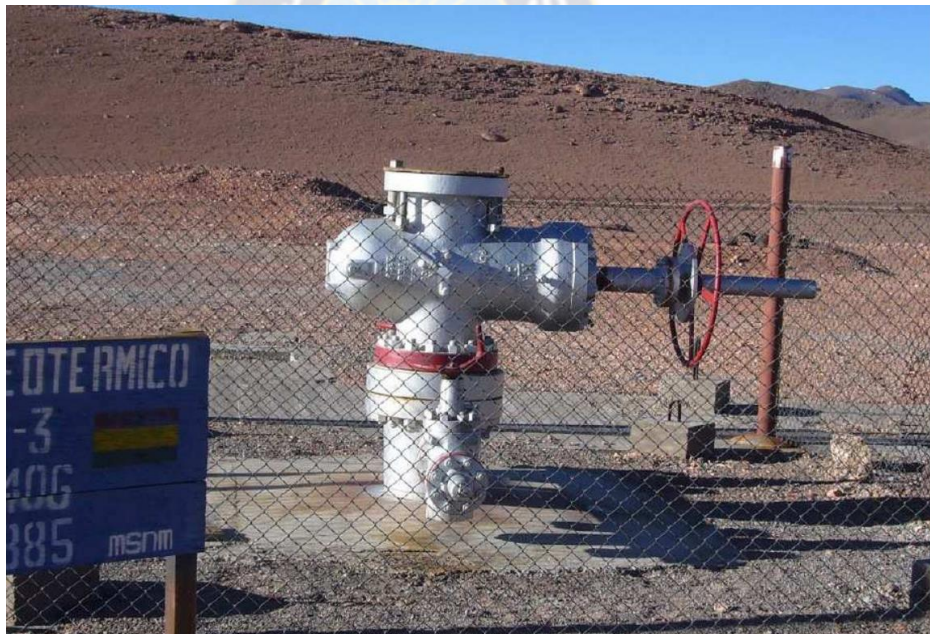


Fuente: *Peredo - ENDE (2008).*

(3) SM-3

- Según la prueba de producción llevada a cabo entre enero y febrero del 2013, la tasa o velocidad de flujo total máxima fue aproximadamente de 258 [ton/h] y la tasa o velocidad de flujo de vapor máxima fue de alrededor de 43 [ton/h]. La entalpía específica máxima del fluido de producción fue de aproximadamente 1.150 [kJ/kg].
- La condición del pozo seguía siendo buena en el 2013.
- Los valores kh alrededor de SM – 3 eran muy elevados, estimándose en 50 [darcy– m].
- La temperatura máxima fue de 247°C (diciembre del 2012), lo cual era casi igual a la temperatura medida 15 años atrás (aproximadamente 245°C).

Figura 4.12: Cabezal de pozo SM-3 – Sol de Mañana.



Fuente: Peredo - ENDE (2008).

(4) SM-4

- Según las pruebas a los pozos llevadas a cabo en diciembre del 2012, la temperatura máxima fue de 224°C (diciembre del 2012), la cual era más baja que la temperatura de los otros pozos (240°C – 250°C).
- Casi igual a la temperatura que se registró hace unos 15 años (245°C).
- Se dedujo las discontinuidades hidráulicas entre SM – 4 y otros pozos.
- Según los resultados de las pruebas de reinyección de SM – 4, la tasa o velocidad más elevada posible de agua de reinyección se estimó en 600 [m3/h] o más, bajo las condiciones atmosféricas.

Figura 4.13: Sol de Mañana – Cabezal de pozo SM-4.



Fuente: Peredo - ENDE (2008).

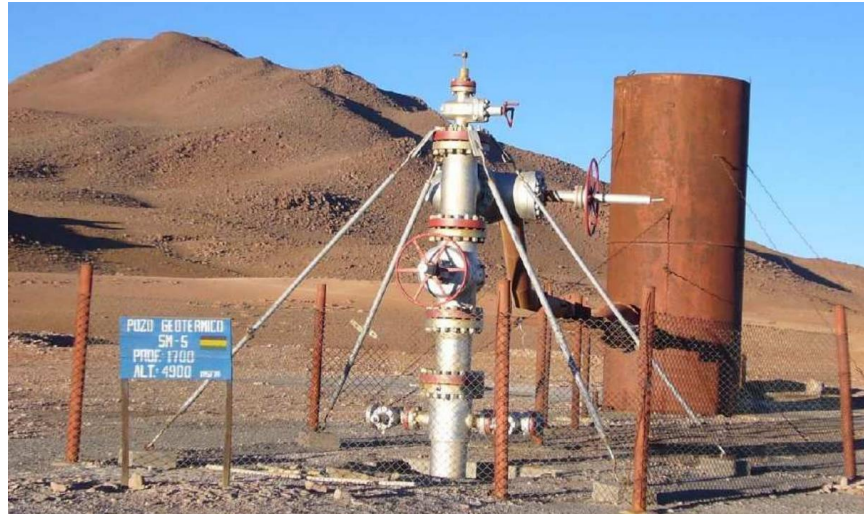
(5) SM-5

- Según la prueba de producción llevada a cabo entre mayo y agosto de 1997, la tasa o velocidad de flujo total máxima fue aproximadamente de 220 [ton/h] y la tasa o velocidad de flujo de vapor máxima fue de alrededor de 35 [ton/h]. La entalpía específica máxima del fluido de producción fue de aproximadamente 1.150 [kJ/kg].
- Los valores kh alrededor de SM – 5 se estimaron en 130 [darcy–m], basándose en los resultados de la prueba de edificación. Según las pruebas de producción, el valor kh se estimó en 20 [darcy–m].
- La temperatura máxima fue de 248°C (mayo de 1997).

(6) AP-1

- Según la prueba de producción llevada a cabo entre 1987 y 1990, la entalpía específica máxima del fluido de producción fue de aproximadamente 1,400 [kJ/kg]. Sin embargo, la tasa o velocidad de flujo total fue más bien pequeña, como de unos 30 [ton/h].
- Aunque la temperatura era alta, la productividad de AP – 1 fue pequeña.
- La temperatura máxima fue de 245 °C (mayo de 1997).

Figura 4.14: Sol de Mañana – Cabezal de pozo SM-5.



Fuente: Peredo - ENDE (2008).

(7) Efectos de Interacción entre Pozos

- De acuerdo con el informe de JICA (2013), basado en los resultados de las mediciones de presión en las pruebas de producción, concluye que la interferencia entre los pozos SM – 1, SM – 2 y SM – 3 es baja.
- Sin embargo, es probable que la presión de SM – 1 disminuya ligeramente durante las pruebas de producción de SM – 2, lo cual podría indicar algún efecto de interacción entre SM – 1 y SM – 2.

4.7. ESTRUCTURA DEL RESERVORIO

En los informes referidos, la estructura del reservorio está construida en base a la interpretación de la geología superficial, falla/lineamiento, alteración hidrotermal, manifestaciones geotérmicas, geología de los pozos y resistividad aparente. La distribución de las fallas, la profundidad de la capa de rocas y el reservorio potencial y la distribución de la temperatura del subsuelo se estimaron de manera apropiada y pueden utilizarse para la ubicación de los objetivos de perforación de pozos. Las condiciones para la ubicación de los pozos son las siguientes:

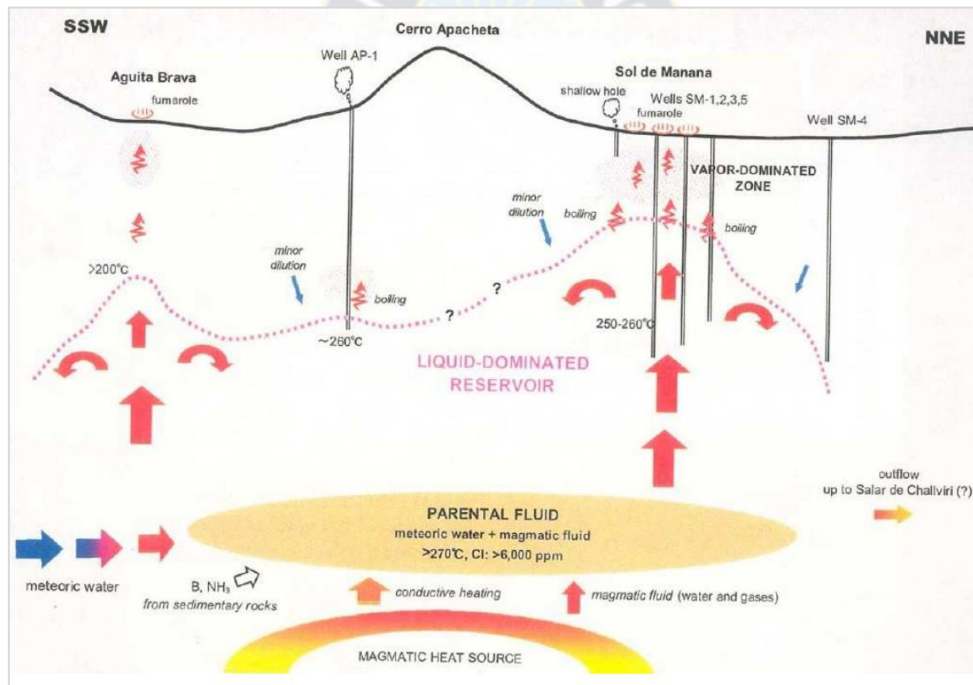
- Las fallas ONO – ESE parecen controlar el flujo y la distribución del fluido geotérmico en los reservorios de Sol de Mañana y Cerro Apacheta (la falda oeste).
- La falla NO – SE ubicada entre los pozos SM – 1 y SM – 4 actúa como una barrera hidráulica.
- La profundidad desde la superficie hasta unos 800 [m] se puede reconocer como capa sello de rocas debido a la baja permeabilidad de dicha zona. La profundidad por debajo de 900 a 1.000 [m] puede reconocerse como un reservorio geotérmico altamente permeable.

- Las mediciones en los pozos indican que la temperatura puede ser de 240°C a 250°C, a excepción del pozo SM – 4, cuya temperatura puede ser tan baja como 220°C.

4.8. FUENTE DE CALOR

La fuente de calor se interpreta adecuadamente en base a las actividades volcánicas del Cuaternario. La roca volcánica más joven es la andesita (hace entre 0,35 y 50 Millones de años) que se distribuye alrededor del Cerro Apacheta. Los volcanes activos alrededor del área del estudio son el Cerro Deslinde, el Cerro Volcán, los Cerros del Tatio, y el Volcán Tatio en los Andes occidentales. Una gran cámara magmática que apoya a estos volcanes activos parece ser la que suministra calor en una gran área, incluyendo el Campo de Laguna Colorada.

Figura 4.15: Sistema geotérmico Laguna Colorada.



Fuente: Peredo - ENDE (2008).

4.9. FLUIDO GEOTÉRMICO

Debido a que el fluido geotérmico es un medio que transporta calor desde el reservorio geotérmico, el origen y el estado del fluido geotérmico debe interpretarse junto con la estructura del reservorio y la fuente de calor arriba mencionadas. En el modelo propuesto, se hace una interpretación válida para el agua meteórica como el origen del fluido geotérmico, el cual penetra a una profundidad y adquiere calor, y finalmente retorna a la superficie en un proceso de convección en el reservorio. Los objetivos de perforación se fijarán en el lugar donde el flujo del fluido geotérmico ocurra con la mayor probabilidad, de

tal forma que las condiciones de dicho objetivo de perforación puedan extraerse del modelo conceptual, como sigue:

- El fluido caliente parece ascender principalmente hacia los alrededores del pozo SM – 1 (Sol de Mañana) y el pozo AP – 1 (Cerro Apacheta).
- El fluido geotérmico fluye a lo largo de las fallas ONO – ESE hacia el Noroeste. El fluido caliente en dirección OEO, manteniendo una alta temperatura, tiene el potencial del objetivo de perforación.
- Existe una barrera hidráulica (una falla en dirección NO) que evita que el fluido fluya entre los pozos SM – 1 y SM – 4.

4.10. ESTRUCTURA DEL RESERVORIO¹⁷

(a) Sistema de Fallas

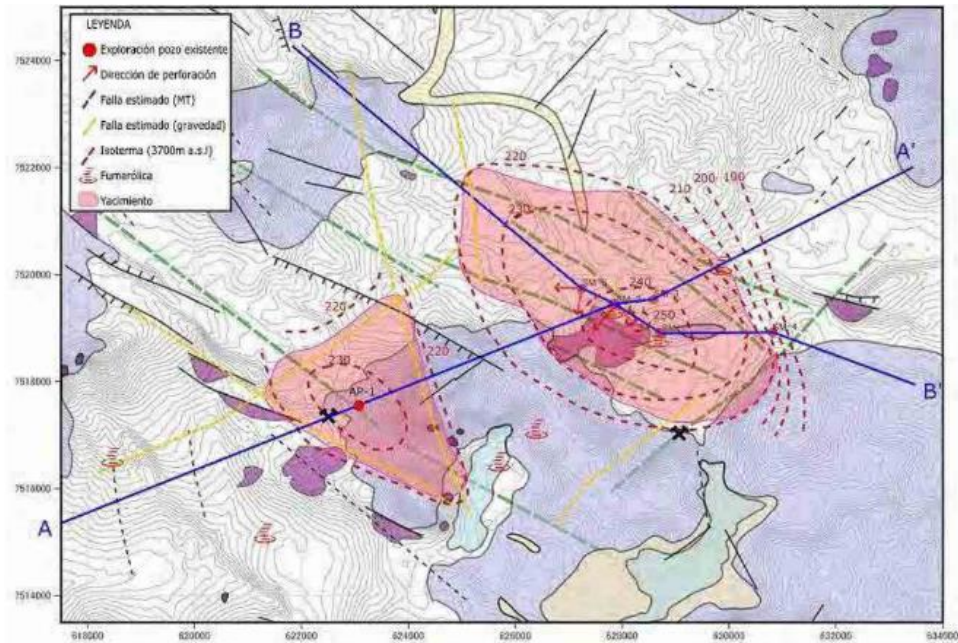
- La mayoría de las fallas son en la dirección ONO – ESE, y algunas son desplazadas por las fallas en la dirección NE – SO. Estas fallas parecen controlar el flujo y la distribución del fluido geotérmico en el sitio del Proyecto.
- La información geomórfica, los mapas de resistividad 3D y la información de la perforación de los pozos indican mayormente que las fallas ONO – ESE deben ser fallas de tipo normal. La falla ONO – ESE del objetivo de perforación, distribuido al lado Oeste de los pozos existentes (SM–1, SM–2 y SM–5) parece que se inclina hacia el Suroeste.
- El buzamiento o tendencia de las fallas de tipo normal fueron inferidas en los reportes previos. Sin embargo, no hay evidencias de observación geológica de fallas en afloramientos ni en los pozos existentes.
- De acuerdo con la información de las mediciones en los pozos, la temperatura puede ser 240°C – 250°C, excepto en el pozo SM–4 que muestra una temperatura tan baja como 220°C. Una falla con dirección ONO – ESE localizada entre los pozos SM–1 y SM–4 parece ser una barrera hidráulica, como se ha dicho antes.

(b) Capa de Roca Sello

- La zona arcillosa y la parte superior de la zona silícea, las cuales son las secciones de baja permeabilidad en los pozos existentes, probablemente forman una capa de roca sello del reservorio geotérmico. La distribución de la capa de rocas sello corresponde a la zona de menos de 10 [Ωm].
- La distribución de la zona de baja resistividad y los resultados de los pozos existentes ha revelado que desde la superficie hasta una profundidad de 800 [m] puede ser reconocido una capa de roca sello debido a la baja permeabilidad de esta parte. Las profundidades por debajo de los 900 a 1.000 [m] pueden reconocerse como reservorio geotérmico de alta permeabilidad.

¹⁷ JICA (2015). *Construcción de la planta geotérmica Laguna Colorada.*

Figura 4.16: Modelo conceptual revisado del campo Geotérmico Laguna Colorada.



Fuente: JICA (2013).

4.11. CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

La planta de generación será construida al Este del cerro Apacheta a 20 [km] al Sur de Laguna Colorada. Está planta estará ubicado en un terreno plano, a una altura de 4900 [m.s.n.m.]. Debido a que se encuentran varias manifestaciones geotérmicas superficiales en el área, la planta será ubicada alejada de estas manifestaciones. La planta estará cercana a la plataforma del pozo SM-3, para la óptima utilización del recurso geotérmico.

Dependiendo de la conveniencia técnica y disponibilidad de los fabricantes, podrían también ser dos turbinas de 50 [MW] cada una. Se ha seleccionado dividir la potencia máxima en cuatro grupos (o en dos grupos) para facilitar el transporte e instalación y para lograr de este modo que la energía provista esté menos sujeta a fluctuaciones debido a la eventual suspensión temporal del servicio en alguna de las unidades. Las unidades serán operadas continuamente a carga máxima para satisfacer carga base a manera de hacer mejor uso del vapor procedente de los pozos geotérmicos.

La planta será emplazada en un área aproximada de 300 [m] x 240 [m] con suficiente espacio para la generación de 100 [MW] incluyendo una playa de transmisión, una oficina de administración, talleres mecánicos, almacenes y otras instalaciones asociadas. La planta será accesible desde el lado Este y Oeste por caminos de acceso que deberán ser habilitados. Las torres de enfriamiento estarán ubicadas dentro del recinto de la planta, para minimizar los efectos de la pluma húmeda de la torre de enfriamiento en los equipos de la planta, particularmente el equipo eléctrico de la playa de distribución dependiendo de la dirección predominante del viento.

La casa de máquinas estará ubicada en el centro de la planta y albergará las turbinas de vapor, los generadores, las salas eléctricas y la sala de control. Se localizará los condensadores y el sistema de extracción de gas al aire libre entre la casa de máquinas y la torre de enfriamiento. Por otro lado, se ubicará los transformadores principales al aire libre entre la casa de máquinas y la playa de distribución (switchyard). La playa de distribución estará ubicada en el lado Norte de la planta y la línea de transmisión será extendida desde este punto hasta la nueva subestación.

4.12. CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN AÉREA

Comprende lo construcción de la subestación de Sol de Mañana, la nueva subestación San Cristóbal y la línea de transmisión propiamente entre ambas subestaciones. Esta línea de transmisión será de circuito simple, con una tensión de 230 [kV] y una longitud cerca de 170 [km]. La subestación Sol de Mañana, constituye la subestación de salida de la planta geotérmica y la nueva Subestación San Cristóbal constituye la subestación de llegada al nodo de empalme más cercano con el Sistema Interconectado Nacional (SIN) La subestación existente alimenta a la Mina San Cristóbal a través de la línea de transmisión de 230 [kV] San Cristóbal — Puntuma también existente¹⁸.

Tabla 4.3: Especificaciones principales de la línea de transmisión.

DESCRIPCIÓN	DATOS TÉCNICOS
Tensión de operación	230kV
Frecuencia de operación	50 Hz
Tipo de estructuras (torres)	Acero galvanizado reticulado
Disposiciones de conductores	Horizontal, un conductor por fase
Longitud Total	Aproximadamente 170 km
Cantidad de Estructuras (torres)	Aproximadamente 425
Tamaño y Tipo de conductor	ACSR 1500 MCM (765,4mm ²)
Numero de Circuitos	1
Capacidad de transmisión	Aproximadamente 150 MW
Derecho de servidumbre	35 m

Fuente: UNASUR (2010).

En base a lo establecido en la Resolución No. 160/2001 de la Superintendencia de electricidad, la franja de seguridad de la línea de transmisión (Derecho de Servidumbre), de acuerdo con las características previstas para la línea y estructuras de soporte, ha sido estimada como máximo en 35 [m] de ancho. En este contexto, el área total de la franja de servidumbre es del orden de 595 [Ha], sin embargo, la ocupación real de las estructuras será del orden de 10 [Ha] como máximo.

¹⁸ UNASUR (2010). *Proyecto geotérmico Laguna Colorada*.

Tanto la Subestación Eléctrica Sol de Mañana, como la nueva Subestación San Cristóbal, tendrán patios de distribución que permitan la conexión a las redes de distribución en voltaje medio para el suministro a los proyectos de electrificación rural en la zona.

Tendido y tesado de la línea de transmisión. Se realizará el tendido de una longitud de conductores de aproximadamente 550 [km] y cable de guardia de aproximadamente 367 [km], así como de cadenas de aisladores en general y de los amortiguadores en los conductores.

El tendido de conductores se realiza por tramos, generalmente entre torres de ángulo o anclaje y el fin de línea, por lo que no es necesario situar las máquinas en todas las torres. Para el tendido se utiliza un cable guía que se lleva manualmente de una torre a otra, pasándolo por poleas, situadas en los mismos, lo que permite el posterior izado de los conductores hacia sus posiciones finales en las estructuras. Para realizar esta operación se requiere la apertura de una franja de aproximadamente 6 [m] de ancho en línea recta entre cada estructura, ya que los conductores son delicados, costosos y no pueden ser arrastrados por el piso, ni deben correr el riesgo de engancharse con la vegetación circundante.

El tendido y tensado de los cables se realiza mediante una máquina de freno (situada en punto externo para cada tramo de tendido) que va desenrollando los cables de una bobina situada en la máquina de tendido (ubicada en el punto inicial de cada tramo de tendido), mientras otro equipo los tensa, pasándolos por las torres mediante el cable guía. En el caso del cable de tierra, la puesta a tierra se realiza para cada torre.

Figura 4.17: Montaje de torres de transmisión.



Fuente: ELEC-EP (2022).

4.13. MANEJO E IMPACTOS ESPECIFICOS DE LA INDUSTRIA

La siguiente sección contiene una síntesis de las cuestiones relativas al medio ambiente, la salud y la seguridad asociadas a la generación de energía geotérmica, así como recomendaciones para su manejo. Por otra parte, en las guías generales sobre Medio Ambiente, Salud y Seguridad (MASS) se ofrecen recomendaciones sobre la gestión de las cuestiones de este tipo que son comunes a la mayoría de los grandes establecimientos industriales durante las etapas de construcción y de desmantelamiento¹⁹.

4.14.1. MEDIO AMBIENTE

Entre las cuestiones ambientales a que pueden dar lugar los proyectos de generación de energía geotérmica se encuentran las siguientes:

- Efluentes.
- Emisiones a la atmósfera.
- Residuos sólidos.
- Reventones en pozos y fallos en las tuberías.
- Consumo y extracción del agua.

4.14.1.1. Efluentes

4.14.1.1.1. Fluidos y detritos de perforación

Durante las actividades de exploración, desarrollo y operación pueden instalarse pozos de producción de vapor y reinyección. Los fluidos de perforación empleados durante las actividades de perforación pueden ser acuosos u oleosos, y pueden contener aditivos químicos para ayudar a controlar las variaciones de presión en el sondeo e impedir la pérdida de viscosidad. Los detritos procedentes de los lodos oleosos son especialmente preocupantes debido a los contaminantes oleosos que contienen, y pueden precisar un tratamiento y eliminación especiales dentro o fuera del emplazamiento. Las recomendaciones para el manejo de los detritos y fluidos de perforación incluyen:

- La recuperación y almacenamiento de fluidos y detritos oleosos de perforación en tanques o pozos de almacenamiento dedicados, revestidos con una membrana impermeable, antes del tratamiento (p. ej. lavado), reciclaje y /o tratamiento final y eliminación.
- La reutilización de fluidos de perforación, cuando sea posible.
- La eliminación de tanques y pozos para evitar la descarga presente o futura de materiales oleosos en el suelo o en los recursos hídricos y el tratamiento / eliminación de los contenidos como residuos peligrosos o no peligrosos en función de sus propiedades.

¹⁹ **Corporación Financiera Internacional (2007).** *Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la generación de energía geotérmica.*

- La eliminación de fluidos acuosos de perforación en el pozo de sondeo tras una valoración de la toxicidad. Los detritos acuosos suelen reutilizarse siempre que no sean tóxicos (p. ej. como relleno de construcción) o se eliminarán en un vertedero.
- Durante el tratamiento ácido de los pozos, el uso de encofrados de pozo a prueba de fugas a profundidades adecuadas a la formación geológica para evitar la filtración de fluidos acidicos en las aguas subterráneas.

4.14.1.1.2. Fluidos geotérmicos usados

Los fluidos geotérmicos usados consisten en agua de desecho procedente de los separadores de vapor (el agua desechada presente inicialmente en el vapor procedente de la reserva geotérmica) y el condensado derivado de la condensación del vapor usado después de la generación de electricidad. Las instalaciones que utilizan torres de refrigeración de agua durante el proceso de evaporación suelen dirigir el condensado geotérmico al ciclo de refrigeración. El condensado geotérmico puede caracterizarse por altas temperaturas, un reducido pH y un contenido en metales pesados. Las aguas de desecho procedente de los separadores presentan a menudo un pH neutro y pueden contener metales pesados. La calidad del vapor y el agua de formación depende de las características del recurso geotérmico.

El manejo recomendado para los fluidos geotérmicos incluye:

- La cuidadosa evaluación de los posibles impactos ambientales de las descargas de fluido geotérmico en función del sistema de refrigeración elegido.
- Cuando las instalaciones no reinyecten todos los fluidos geotérmicos bajo tierra, la calidad de la descarga de efluentes deberá ajustarse al uso de la masa de agua receptora tal y como describen las guías generales sobre MASS. Esto podría implicar un ajuste de la temperatura del efluente según la normativa local o normas específicas del emplazamiento basadas en los posibles impactos sobre la masa de agua receptora. Cuando se registren elevadas concentraciones de metales pesados en los fluidos geotérmicos, se aplicarán buenos criterios a la hora de descargarlos en masas de agua naturales que puedan precisar la construcción y operación de instalaciones de tratamiento complejas y costosas.
- Cuando la reinyección sea la alternativa seleccionada, se minimizarán las probabilidades de contaminación de las aguas subterráneas mediante la instalación de encofrados de pozo a prueba de fugas en los pozos de inyección a una profundidad ajustada a la formación geológica que albergue la reserva geotérmica.

- Se estudiarán las oportunidades para reutilizar los fluidos geotérmicos desechados, incluyendo:
 - El uso de tecnologías binarias de generación de electricidad.
 - La utilización en procesos industriales aguas abajo, siempre que la calidad del agua desechada (incluidos los niveles de metales pesados totales y disueltos) respete los requisitos de calidad en función del uso final. Algunos ejemplos de usos aguas abajo incluyen las aplicaciones de calor, como son invernaderos, acuicultura, calefacción de locales, procesamiento de alimentos / frutas y uso recreativo para hoteles / balnearios, entre otros.

4.14.1.2. Emisiones a la atmósfera

Las emisiones de las plantas de energía geotérmica son mínimas en comparación con las plantas de electricidad basadas en la combustión de combustibles fósiles. El ácido sulfhídrico y el mercurio son los principales contaminantes del aire asociados con la generación de energía geotérmica por medio de tecnologías de evaporación instantánea o vapor seco. El dióxido de carbono está presente en el vapor, aunque sus emisiones también se consideran mínimas en comparación con las fuentes de combustión de combustibles fósiles. La presencia y concentración de posibles contaminantes del aire puede variar dependiendo de las características de la fuente geotérmica.

Las emisiones pueden producirse durante las actividades de perforación de pozos y las pruebas de flujo, a través de los condensadores de contacto / torres de refrigeración abiertos, a menos que se bombeen fuera del condensador y se reinyecten en la reserva junto con los fluidos geotérmicos desechados. Los silenciadores de ventilación en los campos de pozos y las plantas pueden ser también fuentes potenciales de emisiones de ácido sulfhídrico, sobre todo en condiciones operativas alteradas que requiera ventilación. Las tecnologías binarias y las que combinan evaporación instantánea / tecnología binaria (con tecnología de condensación sin contacto) casi no emiten ácido sulfhídrico y mercurio a la atmósfera, gracias a la reinyección de todos los fluidos y gases geotérmicos.

Los métodos recomendados para el manejo de las emisiones a la atmósfera incluyen:

- Estudiar las opciones tecnológicas que impliquen la reinyección total o parcial de gases con fluidos geotérmicos en el contexto de los posibles impactos ambientales ocasionados por tecnologías alternativas de generación junto con otros factores primarios, como el ajuste de la tecnología al recurso geológico y las consideraciones económicas (p. ej. costes de capital y explotación / mantenimiento).
- Cuando la reinyección total no sea factible, se ventilará el ácido sulfhídrico y el mercurio volátil no condensable siempre que, basándose en una evaluación del impacto potencial en las concentraciones ambiente, los niveles de contaminantes no excedan las normas aplicables de higiene y seguridad.

- Cuando sea necesario, emplear sistemas reductores para eliminar las emisiones de ácido sulfhídrico y mercurio procedentes de gases no condensables. Entre los posibles controles de ácido sulfhídrico se incluyen lavadores húmedos o secos y sistemas de reducción de fase líquida / oxidación, mientras que los controles de emisiones de mercurio pueden consistir en la condensación de la corriente de gas con métodos adicionales de separación y adsorción.

4.14.1.3. Residuos sólidos

Las tecnologías geotérmicas no producen cantidades sustanciales de residuos sólidos. Los precipitados de azufre, silicio y carbonato proceden normalmente de las torres de refrigeración, sistemas de depuración de gases, turbinas y separadores de vapor. Estos lodos pueden calificarse de peligrosos en función de la concentración y las probabilidades de filtración de los compuestos de silicio, cloruros, arsénico, mercurio, vanadio, níquel y otros metales pesados. Las guías generales sobre MASS describen el manejo recomendado para los residuos peligrosos, lo que implica el almacenamiento y contención en el emplazamiento antes del tratamiento final y la eliminación en una instalación de residuos adecuada. Cuando los lodos sean de calidad aceptable y no contengan un nivel significativo de metales filtrables (es decir, cuando se trate de residuos no peligrosos), podrá estudiarse la posibilidad de reutilizarlos dentro o fuera del emplazamiento como opción para su eliminación. Los sólidos recuperables, como la torta de azufre, deben reciclarse en la medida de lo posible en plantas externas. Los métodos de eliminación se determinarán inicialmente mediante análisis químicos adecuados de los precipitados, que se repetirán periódicamente (p. ej., anualmente) para tener en cuenta las posibles variaciones geoquímicas y los impactos resultantes en la calidad del agua.

4.14.1.4. Reventones en pozos y fallos en las tuberías

Aunque altamente improbables, durante la perforación de pozos y el funcionamiento de las instalaciones pueden producirse reventones de pozos y fallos en las tuberías. Estos fallos pueden provocar el vertido de aditivos y fluidos tóxicos de perforación, así como gases de ácido sulfhídrico procedentes de formaciones subterráneas. Las roturas en las tuberías también pueden ser el resultado de la liberación superficial de fluidos y vapores geotérmicos que contengan metales pesados, ácidos, depósitos minerales y otros contaminantes.

Los métodos recomendados para controlar y prevenir la contaminación en caso de reventones en pozos o las roturas en las tuberías incluyen:

- El mantenimiento periódico de bocas de pozos y conductos de fluidos geotérmicos, incluidos el control y la inspección de la corrosión; el seguimiento de la presión; y el uso de equipos de prevención de reventones, como por ejemplo las válvulas de corte.
- El diseño de respuestas ante emergencias en caso de reventón en los pozos o roturas en las tuberías, incluidas las medidas destinadas a la contención de vertidos de fluidos geotérmicos.

4.14.1.5. Consumo y extracción del agua

La extracción de aguas superficiales es necesaria para distintas actividades de generación de energía geotérmica, incluida la perforación de pozos, las pruebas de inyectividad de las formaciones subterráneas y su uso en los sistemas de refrigeración. El agua superficial empleada durante la refrigeración sin contacto en una pasada suele regresar a la fuente con un contenido calorífico aumentado en alguna medida, aunque sin cambios generales en términos de calidad.

Se recomiendan las siguientes medidas de manejo para conservar las fuentes de agua empleadas en las actividades de generación geotérmica:

- Evaluar los registros hidrológicos sobre la variabilidad a corto y largo plazo de las corrientes que sirven de agua original, garantizando el mantenimiento de los fluidos críticos durante las épocas de flujos bajos para no obstaculizar la circulación de los peces o perjudicar a la biota acuática.
- Supervisar las variaciones de temperatura del efluente y de las masas de aguas receptoras para cumplir con la normativa local relativa a la descarga térmica o, en ausencia de tal normativa, de acuerdo con los principios señalados anteriormente en el presente documento.

Por ejemplo, las plantas de energía geotérmica emiten aproximadamente un 1% de óxido de azufre (SOx) y óxido de nitrógeno (NOx) y un 5% de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) procedentes de las plantas de energía térmica con una capacidad de generación eléctrica similar suministrada con carbón (Duffield y Sass - 2003).

4.15. HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO

Los riesgos que la construcción y el desmantelamiento de los proyectos de generación de energía térmica entrañan para la higiene y la seguridad en el trabajo son similares a los que se producen en la mayoría de las instalaciones industriales; su prevención y control se analizan en las guías generales sobre MASS.

Las cuestiones sobre higiene y seguridad específicamente relacionadas con los proyectos de generación de energía geotérmica incluyen la posible exposición a:

- Gases geotérmicos.
- Espacios reducidos.
- Calor.
- Ruido.

4.15.1. GASES GEOTÉRMICOS

La exposición en el trabajo a los gases geotérmicos, principalmente al gas de ácido sulfhídrico, puede darse durante el vertido extraordinario de fluidos geotérmicos (por ejemplo, como consecuencia de fallos en las tuberías) y labores de mantenimiento en espacios reducidos como son tuberías, turbinas y condensadores. La importancia del riesgo que supone el ácido sulfhídrico puede variar en función de la ubicación y formación geológica propia de las instalaciones.

Cuando exista la probabilidad de exposición a niveles peligrosos de ácido sulfhídrico, las instalaciones de generación de energía geotérmica tendrán en cuenta las siguientes medidas de manejo:

- Instalar sistemas de seguimiento y alerta de ácido sulfhídrico. El número y la ubicación de monitores se determinarán sobre la base de una evaluación de las ubicaciones de las plantas más propicias para la emisión de ácido sulfhídrico y para la exposición ocupacional.
- Elaborar un plan de emergencia para los vertidos de ácido sulfhídrico, incluyendo todos los aspectos relativos a la evacuación y la vuelta a las operaciones normales.
- Proporcionar equipos de respuesta ante emergencias en las instalaciones, monitores personales de ácido sulfhídrico, aparatos respiratorios autónomos y suministro de oxígeno de emergencia, además de capacitar sobre el uso seguro y efectivo de los mismos a los trabajadores que se encuentren en áreas con alto riesgo de exposición.
- Proporcionar sistemas de ventilación adecuados para los edificios ocupados que eviten la acumulación de gas de ácido sulfhídrico.
- Elaborar e implementar un programa de acceso a espacios cerrados para las zonas designadas como tales.
- Proporcionar a los trabajadores hojas informativas o información accesible sobre la composición química de las fases líquida y gaseosa, con una explicación sobre sus posibles implicaciones para la salud y la seguridad humana.

4.15.2. ESPACIOS CERRADOS

Los riesgos asociados a los espacios cerrados en éste y otros sectores industriales pueden ser letales. La entrada de trabajadores en espacios cerrados y la posibilidad de que se produzcan accidentes pueden variar de unas instalaciones geotérmicas a otras en función del diseño y de los equipos e infraestructura del emplazamiento. Las áreas específicas y exclusivas de espacios cerrados pueden ser las turbinas, condensadores y torres de refrigeración de agua (durante las actividades de mantenimiento), los almacenes que alberguen los equipos de seguimiento (durante la toma de muestras) y la “bodega” del pozo (una depresión subterránea creada para realizar perforaciones).

4.15.3. CALOR

La exposición ocupacional al calor se produce durante las actividades de construcción y durante la operación y mantenimiento de tuberías, pozos y equipos calientes asociados. La exposición no rutinaria abarca los posibles reventones accidentales producidos durante las labores de perforación, así como el mal funcionamiento de la contención de vapor y las instalaciones de transporte.

Entre las medidas de prevención y control recomendadas en relación con la exposición al calor se cuentan las siguientes:

- Reducir el tiempo requerido para trabajar en entornos a elevadas temperaturas y garantizar el acceso al agua potable.
- Proteger las superficies donde los trabajadores entren en contacto con equipos calientes, incluidos los equipos generadores, conductos, etc.
- Usar los equipos de protección personal (EPP) adecuados, incluidos guantes y calzado aislante.
- Implementar los procedimientos de seguridad adecuados durante el proceso de perforación de exploración.

4.15.4. RUIDO

Las fuentes de ruido en las instalaciones de generación de energía geotérmica están principalmente relacionadas con la perforación de pozos, la expansión instantánea del vapor y la ventilación. Otras fuentes pueden ser los equipos relacionados con las plantas de bombeo, turbinas y actividades de purga de las tuberías. Los niveles temporales de ruido pueden exceder los 100 [dB] durante ciertas actividades de perforación y de ventilación de vapor. La tecnología de reducción del ruido incluye el uso de amortiguadores de piedra, aislamiento sonoro y barreras durante las labores de perforación, además de los silenciadores en los equipos instalados en las plantas de procesamiento del vapor.

4.15.5. METODOLOGÍA²⁰

La metodología por implementar como parte de la investigación se organizó en 3 fases las cuales son: a) preparación, b) ejecución y c) control. La *Figura 4.18* se muestra el proceso a seguir.

4.15.5.1. Fase de Preparación

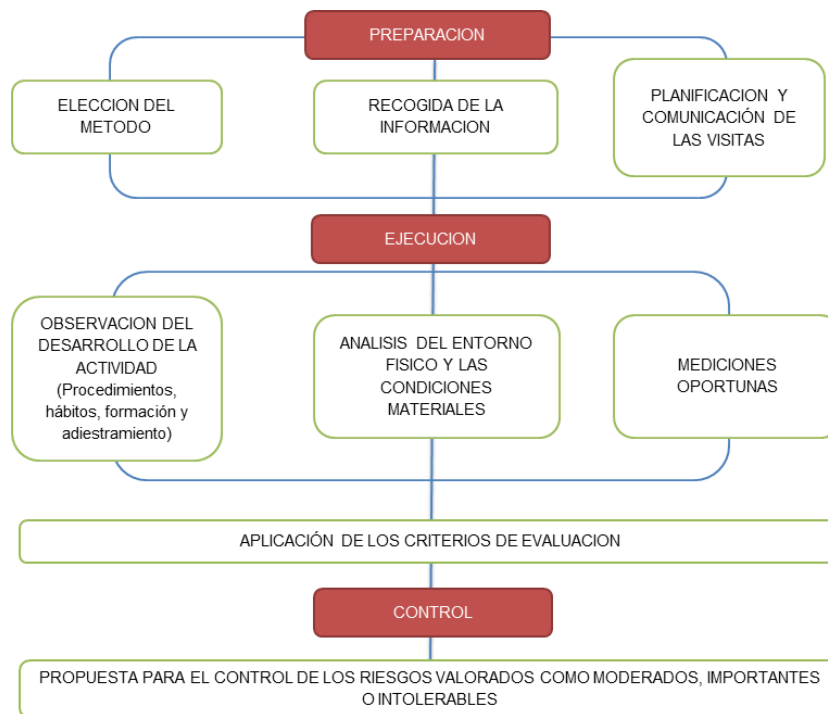
La fase de preparación está formada por tres etapas las cuales son a) Elección del Método; b) Recogida de la información; c) Planificación y comunicación de las visitas, estas tres etapas de estas fases se describen a continuación.

4.15.5.2. Elección del método

Para llevar a cabo un proceso adecuado de prevención de riesgo, es necesario actuar con criterios fundamentados en la detección del problema inicial, es por ello que la metodología selecciona establece que se debe de realizar un proceso lógico que siga los pasos esquematizados en la *Figura 4.19*.

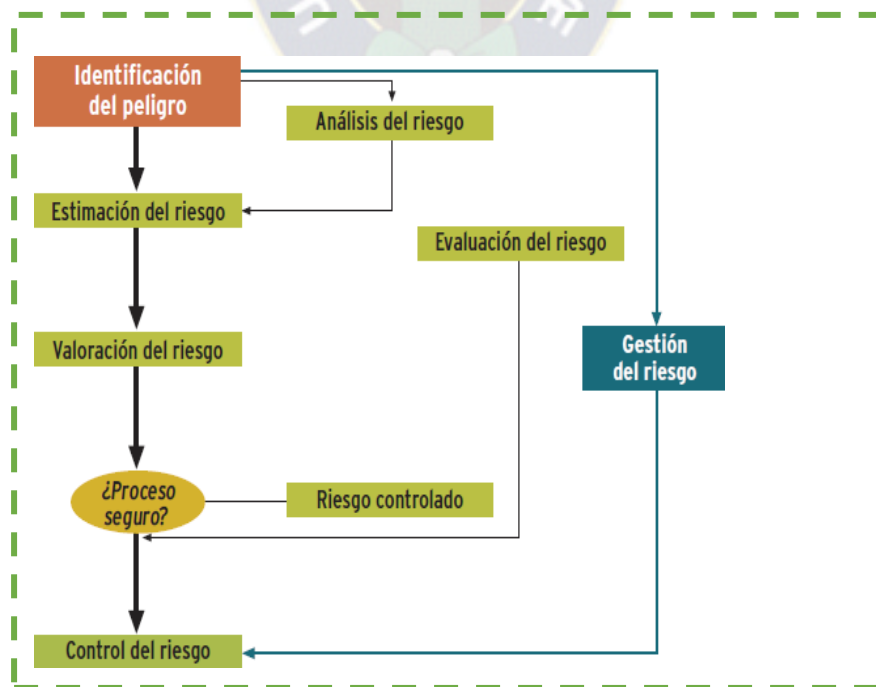
²⁰ **Argueta y Hernández (2018)**. Evaluación de riesgos laborales en la actividad de estimulación química de pozos geotérmicos.

Figura 4.18: Fases de la evaluación del riesgo, modificado.



Fuente: Argueta y Hernández (2018).

Figura 4.19: Metodología de evaluación de riesgos.



Fuente: Argueta y Hernández (2018).

4.15.5.2.1. Identificación de peligros

La *Tabla 4.4* muestra la recopilación de peligros que se identificaron para desde la perforación, prueba de productividad, construcción de planta y puesta en marcha de energía geotérmica.

Tabla 4.4: *Identificación de peligros en la estimulación química de pozos.*

Caídas de personas desde el mismo nivel	Contactos eléctricos directos
Caídas de personas de diferente nivel	Contactos eléctricos indirectos
Caídas de objetos	Exposición a sustancias nocivas o tóxicas
Caídas de objetos en manipulación	Incendios
Choque contra objetos inmóviles	Picadura o mordedura causada por animal o insecto
Choque contra objetos móviles	Quemaduras
Golpes/cortes por objetos	Atropellos o golpes causados por máquina, camión o vehículo
Proyección de fragmentos y/o partículas	Fugas de aceites lubricantes o combustible
Accidentes de tránsito	Empalmes de mangueras o tuberías defectuosas
Inhalación de polvo	Exposición a contaminantes químicos
Atrapamiento por y entre objetos	Exposición a ruidos
Atrapamiento por vuelco de máquinas o equipos	Fatiga por sobreesfuerzo
Exposición a temperaturas Ambientales	Contactos con sustancias cáusticas o corrosivas
Contactos térmicos	

Fuente: Argueta y Hernández (2018).

4.15.5.2.2. Estimación y valoración del riesgo

Una vez identificados los peligros, se procede a estimar el riesgo valorando la probabilidad y consecuencia de que el riesgo se materialice para esto el método establece la magnitud que puede ser Trivial, Tolerable, Moderado, Importante o Intolerable ver *Cuadro 4.3*.

Cuadro 4.3: *Matriz para la valoración del riesgo método binario simplificado.*

		CONSECUENCIAS		
		Ligeramente Dañinos (LD)	Dañinos (D)	Extremadamente Dañinos (ED)
PROBABILIDAD	Baja (B)	Trivial (T)	Tolerable (TO)	Moderado (MO)
	Media (M)	Tolerable (TO)	Moderado (MO)	Importante (I)
	Alta (A)	Moderado (MO)	Importante (I)	Intolerable (IN)

Fuente: Argueta y Hernández (2018).

4.15.5.2.3. Control del riesgo

A partir de la valoración resultante, al hacer la evaluación y la probabilidad por la consecuencia, el método establece acción a tomar dependiendo la valoración y significancia del Riesgo en el *Cuadro 4.3*, se muestran las acciones que recomienda tomar el método utilizado.

Cuadro 4.4: *Acciones a que recomienda tomar el método binario simplificado.*

VALOR DEL RIESGO	ACCION Y TEMPORIZADOR
Trivial (T)	- No se requiere acción específica.
Tolerable (TO)	- No se necesita mejorar la acción preventiva. Sin embargo, se deben considerar soluciones más rentables o mejoras que no supongan una carga económica importante. - Se requieren comprobaciones periódicas para asegurar que se mantiene la eficacia de las medidas de control.
Moderado (M)	- Se deben hacer esfuerzos para reducir el riesgo, determinando las inversiones precisas. Las medidas para reducir el riesgo deben implantarse en un período determinado. - Cuando el riesgo moderado está asociado con consecuencias extremadamente dañinas, se precisará una acción posterior para establecer, con más precisión, la probabilidad de daño como base para determinar la necesidad de mejora de las medidas de control.
Importante (I)	- No debe comenzarse el trabajo hasta que se haya reducido el riesgo. Puede que se precisen recursos considerables para controlar el riesgo. - Cuando el riesgo corresponda a un trabajo que se está realizando, debe remediarse el problema en un tiempo inferior al de los riesgos moderados.
Intolerable (IN)	- No debe comenzar ni continuar el trabajo hasta que se reduzca el riesgo. - Si no es posible reducir el riesgo, incluso con recursos ilimitados, debe prohibirse el trabajo.

NOTA: Si existe un peligro, existe un riesgo

“Si existe un riesgo existe la probabilidad que se materialice, si los riesgos se materializan se originan las consecuencias”.

Fuente: *Argueta y Hernández (2018).*

4.15.6. ANALISIS DE DATOS

4.15.6.1. Valoración del Riesgo

Utilizando la metodología de evaluación de riesgos, se procedió a evaluar cada peligro identificado por subactividad obteniendo los resultados siguientes:

Tabla 4.5: Valoración del riesgo para “Demarcación de espacio en plataforma”

	Probabilidad			Consecuencia						Valor del riesgo				
	B	M	A	LD		D		ED		T	TO	MO	I	IN
PELIGROS IDENTIFICADOS	Baja	Media	Alta	Ligeramente Dañino		Dañino		Extremadamente Dañino		(Trivial)	(Tolerable)	(Moderado)	(Importante)	(Intolerable)
PELIGROS DE ACCIDENTES DE TRABAJO				Lesión	Daño	Lesión	Daño	Lesión	Daño					
Caídas de personas desde el mismo nivel		X		X							X			
Caídas de personas de diferente nivel	X					X					X			
Caídas de objetos en manipulación	X				X					X				
Choque contra objetos inmóviles		X		X							X			
Golpes/cortes por objetos	X			X						X				
Proyección de fragmentos y/o partículas	X			X						X				
Inhalación de polvo		X		X							X			
Exposición a temperaturas Ambientales			X	X								X		
Contactos térmicos		X				X						X		
Contactos eléctricos indirectos	X					X					X			
Incendios	X				X					X				
Picadura o mordedura causada por animal o insecto		X		X							X			
Quemaduras		X		X							X			
Atropellos o golpes causados por máquina, camión o vehículo	X					X					X			
Exposición a ruidos		X		X							X			
Fatiga por sobreesfuerzo	X					X					X			

Fuente: Argueta y Hernández (2018).

4.15.7. HIGIENE Y SEGURIDAD EN LA COMUNIDAD²¹

Los impactos en la higiene y seguridad de la comunidad durante la construcción y desmantelamiento de las plantas de generación de energía térmica son comunes a los de la mayoría de las demás instalaciones industriales.

Los problemas de higiene y seguridad para la comunidad durante las operaciones de las plantas de generación de energía geotérmica incluyen:

- La exposición al gas de ácido sulfhídrico.
- La seguridad de la infraestructura.
- Los efectos de las actividades en los recursos hídricos.

4.15.7.1. Ácido sulfhídrico

Además de la prevención y el control de las emisiones y la exposición al gas de ácido sulfhídrico descritos en las secciones anteriores sobre higiene y seguridad, se estudiará cuidadosamente la posible exposición de los miembros de la comunidad durante el proceso de planificación, implementándose las precauciones que sean necesarias. Cuando las probabilidades de exposición para la comunidad sean significativas, entre las medidas de mitigación se contarán:

- La ubicación de fuentes potenciales considerables de emisiones teniendo en cuenta la exposición al gas de ácido sulfhídrico de las comunidades cercanas (teniendo en cuenta factores ambientales fundamentales como la proximidad, la morfología y la dirección predominante del viento).
- La instalación de una red de seguimiento del gas de ácido sulfhídrico en que el número y emplazamiento de las estaciones de seguimiento obedezca a la modelización de la dispersión del aire y tenga en cuenta la ubicación de las fuentes de emisiones y las zonas de uso comunitario y residencial.
- El funcionamiento continuo de los sistemas de seguimiento de gas de ácido sulfhídrico para facilitar su temprana detección y alerta.
- La planificación de emergencia que tenga en cuenta las aportaciones de la comunidad para lograr una respuesta eficaz ante las alertas de los sistemas de seguimiento.

4.15.7.2. La seguridad de la infraestructura

Las comunidades pueden estar expuestas a los riesgos físicos asociados con los pozos y las redes de tuberías relacionadas. Estos riesgos pueden producirse como resultado del contacto con componentes calientes, fallos en los equipos o la presencia de infraestructuras de pozos activos y abandonados que puedan plantear riesgos de espacios cerrados o de caídas. Las técnicas de manejo recomendadas para mitigar estos impactos incluyen:

- Colocar elementos disuasorios, como por ejemplo vallas y señales de advertencia, para impedir el acceso y alertar sobre los riesgos existentes.

²¹ **Corporación Financiera Internacional (2007).** *Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la generación de energía geotérmica.*

- Minimizar la longitud de los sistemas de tuberías necesarios.
- Considerar la viabilidad de los conductos subterráneos y las pantallas térmicas para impedir el contacto del público en general con las tuberías geotérmicas calientes.
- Clausurar las infraestructuras, como por ejemplo tuberías y carreteras de acceso, incluyendo: la limpieza, desensamblado y retirada de equipos; el análisis de la calidad del suelo, efectuando la limpieza allá donde sea preciso; la repoblación vegetal del emplazamiento y bloqueo; y la recuperación de las carreteras de acceso donde sea necesario.
- Clausurar las bocas de pozo, lo que incluye el sellado de pozos con cemento, la eliminación de la boca de pozo y el relleno de la depresión en torno a la boca de pozo, cuando sea necesario.

4.15.7.3. Los efectos de las actividades en los recursos hídricos

La extracción, reinyección y descarga de fluidos geotérmicos puede afectar a la calidad y cantidad de las aguas superficiales y subterráneas. Entre los impactos específicos se cuentan la introducción accidental de fluidos geotérmicos en los acuíferos productivos más superficiales durante las actividades de extracción y reinyección, o la reducción del flujo de los manantiales térmicos calientes debido a las actividades de extracción. Las medidas recomendadas para prevenir y controlar estos impactos incluyen:

- Elaborar un modelo exhaustivo geológico e hidrogeológico que incluya la arquitectura global geológica, estructural y tectónica, el tamaño de la reserva, los límites y las propiedades geotécnicas e hidráulicas de la roca en el emplazamiento.
- Evaluar el balance hidrogeológico y del agua durante la fase de planificación del proyecto para identificar las interconexiones hidráulicas entre la extracción geotérmica y los puntos de reinyección y las fuentes de agua potable y propiedades de las aguas superficiales.
- Aislar las fuentes productoras de vapor procedentes de formaciones hidrológicas más superficiales que puedan emplearse como fuentes de agua potable mediante la cuidadosa selección del emplazamiento y sistemas de encofrado de los pozos debidamente diseñados e instalados.
- Evitar los impactos negativos en las aguas superficiales introduciendo criterios estrictos para la descarga y los medios adecuados para obtener una calidad del agua y una temperatura basadas en normas aceptables.

4.16. COSTO DE LA ENERGIA GEOTERMICA²²

Las plantas geotérmicas requieren de grandes inversiones de capital al comienzo del proyecto (debido especialmente a las perforaciones), esto es una desventaja frente a las plantas térmicas convencionales.

²² Carta y Calero (2009). *Centrales de energía renovables: generación eléctrica con Energías Renovables*.

Sin embargo, las plantas térmicas fósiles, a pesar de tener menor coste de capital, su costo de combustible se mantiene durante toda la vida de la planta.

Los costos de capital son costos fijos originados por la construcción de la planta. En el caso de la planta geotérmica, estos costos vienen de: costos de terreno, costos de las perforaciones exploratorias y los costos de la propia planta. Este tipo de plantas requieren una inversión de capital elevada, sin embargo, los costos variables son bajos y, obviamente, los costos de combustible son nulos.

Concretamente, los costos de capital de una planta geotérmica se encuentran en el rango de 1.200 – 3.300 [\$us/kW] instalado, dependiendo de las temperaturas, composición del recurso y de la tecnología empleada.

Tabla 4.6: Costos de capital de una planta geotérmica.

TAMAÑO DE LA PLANTA	UNIDAD	RECURSO DE ALTA CALIDAD [\$us]	RECURSO DE CALIDAD MEDIA [\$us]
Plantas pequeñas (<5 MW)	Exploración	400 – 800	400 – 1.000
	Vapor	100 – 200	300 – 600
	Planta de potencia	1.100 – 1.300	1.100 – 1.400
	Total	1.600 – 2.300	1.800 – 3.000
Plantas medias (5 – 30 MW)	Exploración	250 – 400	250 – 600
	Vapor	200 – 500	400 – 700
	Planta de potencia	850 – 1.200	950 – 1.200
	Total	1.300 – 2.100	1.600 – 2.500
Plantas grandes (>30 MW)	Exploración	100 – 400	100 – 400
	Vapor	300 – 450	400 – 700
	Planta de potencia	750 – 1.100	850 – 1.100
	Total	1.150 – 1.750	1.350 – 2.200

Fuente: Carta y Calero (2009).

Tabla 4.7: Comparación de costos de capital con otras fuentes de energía.

RECURSO	COSTE DE CAPITAL [\$us]
Geotérmica	1.500 – 3.000
Hidráulica	735 – 4.778
Carbón	1.070 – 1.410
Nuclear	1.500 – 4.000

Fuente: Carta y Calero (2009).

También se deben tener en cuenta los costes de operación y mantenimiento, que en el caso de una planta geotérmica se encuentran en un rango de 0,0155 – 0,045 [\$us/kWh]. Estas plantas normalmente operan un 90% del tiempo.

Tabla 4.8: Costes de operación y mantenimiento de una planta geotérmica.

Costes de los componentes	Plantas pequeñas (<5 MW) [\$us]	Plantas medias (5 – 30 MW) [\$us]	Plantas grandes (>30 MW) [\$us]
Vapor	0,35 – 0,7	0,25 – 0,35	0,15 – 0,25
Plantas de potencia	0,45 – 0,7	0,35 – 0,45	0,25 – 0,45
Total	0,8 – 1,4	0,6 – 0,8	0,4 – 0,7

Fuente: Carta y Calero (2009).

Tabla 4.9: Comparación de costos de operación y mantenimiento con otras fuentes de energía.

Recurso	Costes de operación y mantenimiento (cent \$us/kWh)
Geotérmica	0,4 – 1,4
Hidráulica	0,7
Carbón	0,46
Nuclear	1,9

Fuente: Carta y Calero (2009).

CAPÍTULO V

DISEÑO Y APLICACIÓN PRÁCTICA - PROYECTO PLANTA GEOTÉRMICA LAGUNA COLORADA

5.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo y en base a toda la información recopilada realizamos el diseño de la Ingeniería básica para el proyecto “Planta Geotermoeléctrica – Sol de Mañana Potosí”.

Los proyectos geotérmicos ocupan grandes extensiones territoriales tanto los Pozos Perforados, el Sistema de Recolección, Planta Geotérmica, Subestación Eléctrica y Sistema de Transmisión, todas estas unidades serán detalladas de manera técnica a continuación. Por tanto, se hará un estudio de la termodinámica del proceso y funcionamiento de la planta geotérmica (Ciclo Termodinámico), para posteriormente mediante este ciclo se halle la forma adecuada para describir las ecuaciones del proceso, se realiza en cálculo y dimensionamiento de los equipos más importantes que componen una planta geotérmica. Las ecuaciones que gobiernan el área geotérmica serán descritas en el proceso termodinámico que se lleva a cabo en plantas, detallando cada etapa del ciclo termodinámico, en función a las ecuaciones del ciclo se efectuara la ingeniería básica del proyecto geotermoeléctrico.

5.2. PROGRAMA DE PERFORACIÓN DE POZOS SOL DE MAÑANA

Para este apartado tomaremos los datos técnicos de los 5 pozos perforados SM-1 ~SM-5 y los pozos programados para la perforación MK-1 ~ MK-13 (Pozos de producción) y MKR-1 ~MKR-6 (Pozos de Reinyección).

Tabla 5.1: Datos técnicos pozos existentes del campo Sol de Mañana.

Pozo	Ubicación [UTM]		Elevación [m]	Profundidad [m]	Tipo de pozo
	X	Y			
SM-1	628743.58	7518885.60	4858.8	1178,5	PRODUCTOR
SM-2	627892.12	7519428.50	4905.6	1486,5	PRODUCTOR
SM-3	628596.10	7519536.07	4884.8	1406,0	PRODUCTOR
SM-4	630813.80	7518915.58	4840.5	1726,2	REINYECCIÓN
SM-5	627246.80	7519738.60	4903.5	1705,0	PRODUCTOR
AP-1	****	****	****	1602,0	REINYECCIÓN

Fuente: JICA (2015).

Tabla 5.2: Datos técnicos pozos proyectados a perforar del campo Sol de Mañana.

Pozo	Ubicación [UTM]		Elevación [m]	Profundidad estimada [m]	Tipo de pozo
	X	Y			
MK-1	626850.00	7519678.00	4900.0	2000,0	PRODUCTOR
MK-2	627173.00	7519327.00	4990.0	2000,0	PRODUCTOR
MK-3	627473.00	7519086.00	4861.0	2000,0	PRODUCTOR
MK-4	628216.00	7519139.00	4871.0	2000,0	PRODUCTOR
MK-5	628802.00	7519320.00	4901.0	2000,0	PRODUCTOR
MK-6	628310.00	7518569.00	4844.0	2000,0	PRODUCTOR
MK-7	628435.00	7519327.00	4890.0	2000,0	PRODUCTOR
MK-8	628110.00	7518650.00	4848.0	2000,0	PRODUCTOR
MK-9	626259.00	7520620.00	4862.5	2000,0	PRODUCTOR
MK-10	626605.00	7520304.00	4873.5	2000,0	PRODUCTOR
MK-11	626993.00	7519541.00	4898.0	2000,0	PRODUCTOR
MK-12	627663.00	7519405.00	4890.0	2000,0	PRODUCTOR
MK-13	628579.00	7518634.00	4843.0	2000,0	PRODUCTOR
MKR-1	629271.00	7517592.00	4832.0	1500,0	REINYECCIÓN
MKR-2	629548.00	7517798.00	4833.0	1500,0	REINYECCIÓN
MKR-3	629484.00	7517471.00	4836.0	1500,0	REINYECCIÓN
MKR-4	629771.00	7517990.00	4833.0	1500,0	REINYECCIÓN
MKR-5	629742.00	7517679.00	4837.0	1500,0	REINYECCIÓN
MKR-6	629974.00	7517867.00	4845.0	1500,0	REINYECCIÓN

Fuente: JICA (2015).

5.3. CONDICIONES AMBIENTALES EN EL CAMPO SOL DE MAÑANA

Según el estudio de la línea de base ambiental efectuado en el Campo Sol de Mañana se tiene los siguientes datos meteorológicos en el lugar de emplazamiento de la planta Geotermoeléctrica y la subestación eléctrica.

Tabla 5.3: Datos meteorológicos en el lugar de emplazamiento del proyecto.

Unidad de la medición	Velocidad del viento [m/s]			Temperatura [°C]			Presión manométrica [mBar]
	Media	Media alta	Dirección predominante	Min.	Max.	Media	
Sol de Mañana 4.900 [m.s.n.m.]	5	13,8	W-SW	6,9	25,7	15	530

Fuente: URS Corporation Bolivia S.A.

También se tiene estudios de calidad de aire, datos de contaminantes, Partículas Suspendingas Totales (PST) y datos de mediciones de gases, información importante a considerar en el diseño y puesta en marcha de los equipos eléctricos de la planta y subestación eléctrica.

Tabla 5.4: Calidad del aire en el lugar de emplazamiento del proyecto.

Ubicación de la Medición	Coordenadas	Contaminante	Periodo Promedio	Ebcaa/Otros Contaminantes	Máxima Concentración Registrada
Laguna Colorada	22°10'28" S 67°49'15" W	TSP	24 horas	260 µg/m ³	108 µg/m ³
		Arsénico	24 horas (Media Anual Promedio)	50 ng/m ³	0,109 µg/m ³ (24 horas)
		H2S	30 minutos – 1 horas	0,008 ppm 0,030 ppm	0,008 ppm 0,007 ppm
Sol de Mañana	22°25'28" S 67°45'24" W	PM10	24 horas	150 µg/m ³	79 µg/m ³
		TSP	24 horas	260 µg/m ³	84 µg/m ³
		Arsénico	24 horas (Media Anual Promedio)	50 µg/m ³	0,150 µg/m ³ (24 horas)

Fuente: URS Corporation Bolivia S.A.

5.4. RECOLECCION DE FLUIDOS Y SISTEMA DE REINYECCION

5.4.1. TRAZO DE LA TUBERÍA

La Recolección de Fluidos y el Sistema de Reinyección (FCRS por sus siglas en inglés) consiste en separadores, tubería de vapor y tubería de salmuera. El *Plano 5.1* muestra el trazo de la tubería entre los pozos MK-01 ~ MK-13 (futuros pozos de producción) será la misma tubería de vapor que ira a la planta generadora de 100 [MW]. El trazo de la tubería de salmuera desde el pozo MK-09 hacia los nuevos pozos de reinyección MKR-01 ~ MKR-06 y el pozo existente SM-4 será la misma línea de reinyección.

5.4.2. PROCESO

El **FCRS** puede ser rápidamente clasificado en dos grupos:

- (1) tubería de dos fases en la cual el fluido geotérmico se transfiere hacia la planta generadora en la forma de mezcla de vapor y salmuera, y
- (2) tuberías separadas en las cuales el vapor y la salmuera se separan cerca de los pozos de producción y luego son transferidos a la planta y a los pozos de reinyección en forma separada.

Para este proyecto, se emplea la segunda debido a que tiene ventajas respecto a la otra en cuanto a pérdidas de presión y estabilidad del flujo. El *Plano 5.1* muestra el **Sistema de Reinyección de Fluidos** y el *Plano 5.2* muestra el **FCRS** diseñados para Sol de Mañana.

El fluido geotérmico (mezcla de vapor y salmuera) de los pozos de producción se separa en vapor y salmuera en los separadores ciclónicos instalados adyacentes a los pozos de producción. El vapor separado junto con los gases no condensables se transfiere al cabezal de vapor de la planta generadora a través de una tubería de vapor, y luego fluye dentro de las 4 unidades de la planta geotermoeléctrica.

En el caso de que se presente un corte forzado o una parada de emergencia en la planta generadora, la válvula de seguridad se abre para reducir la presión de la tubería de vapor. El vapor se descarga a un silenciador antes de ser finalmente liberado a la atmósfera. El agua condensada del silenciador se mezcla con el agua de desecho de la planta y luego es bombeada hacia el pozo de reinyección para aguas de desecho.

La salmuera separada del separador se envía por tubería a los pozos de reinyección. Los rasgos geográficos en el área del proyecto y las características de los pozos de reinyección permiten la reinyección por la presión del separador y por gravedad. No se instalará bomba de reinyección. En el caso de anomalías en el sistema de reinyección, la salmuera se dispone automáticamente en un tanque de retención de emergencia a través de un silenciador adyacente al pozo de producción durante un periodo hasta que el problema sea solucionado o la válvula del cabezal del pozo de producción sea cerrada. Desde el tanque de retención de emergencia la salmuera será enviada a los pozos de reinyección por medio de una bomba portátil.

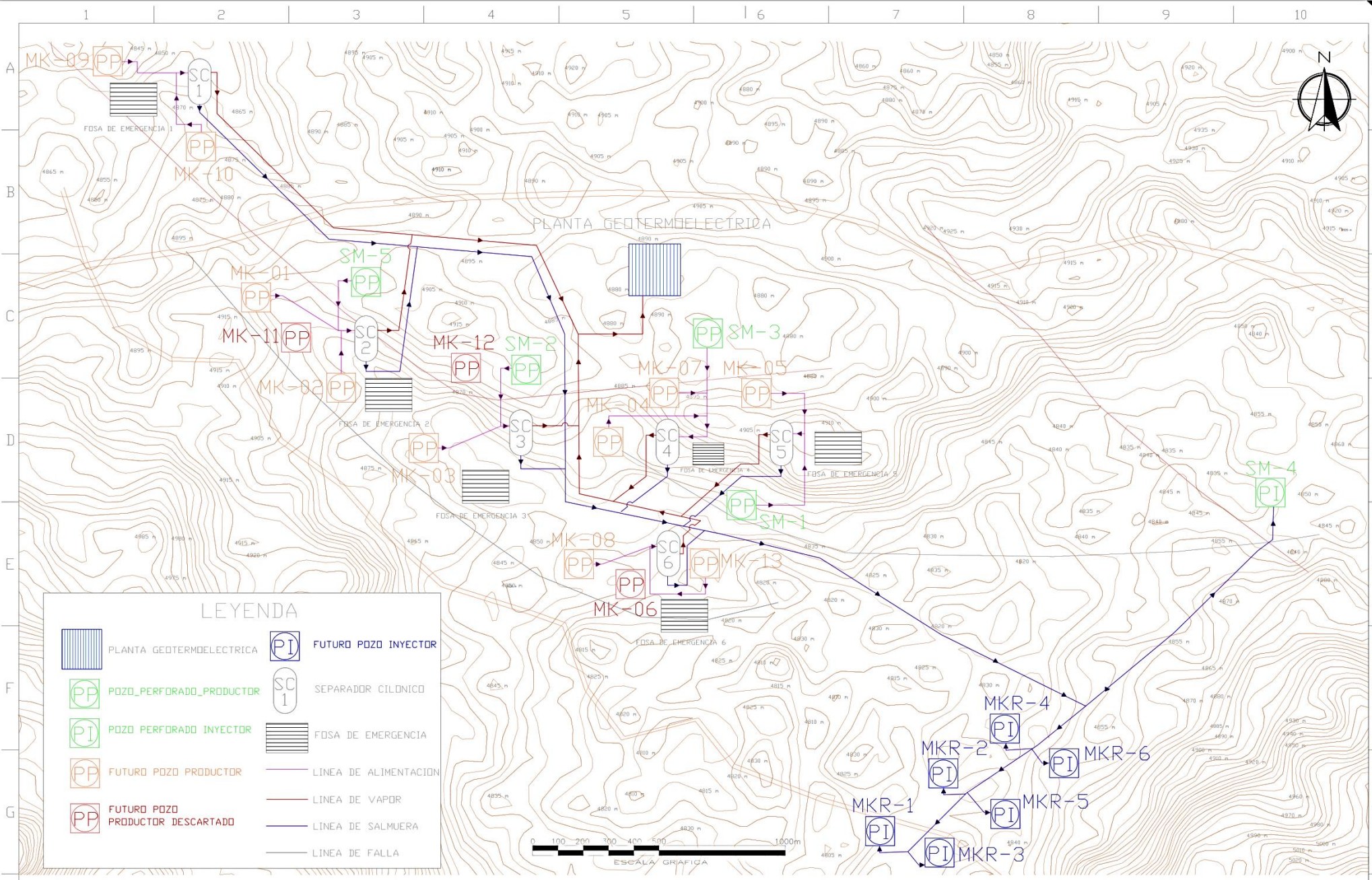
5.5. INSTALACIONES DE LA PLANTA GENERADORA²³

5.5.1. DISEÑO

5.5.1.1. Diseño de la planta generadora

- 1) El *Plano 5.3* muestra el diseño de la planta generadora.
- 2) El sitio para la planta es aproximadamente 300 [m] x 240 [m], e incluye cuatro unidades generadoras de 25 [MW], subestación y oficinas administrativas. Las torres de enfriamiento deberán estar viento abajo, de tal forma que las emisiones de las torres de enfriamiento con gases corrosivos no condensables y brisa no afecten los edificios de la subestación y de la turbina para proteger el equipo de la planta. Las torres de enfriamiento se localizan al Oeste del sitio de la planta generadora, considerando la dirección del viento que prevalece anualmente.
- 3) La subestación se localiza en el lado opuesto de las torres de enfriamiento, es decir al Este del sitio de la planta.
- 4) Los transformadores principales se instalarán en la subestación.
- 5) El edificio para las turbinas está en el centro del sitio de la planta. En este se acomodarán la turbina de vapor y el generador. La sala de mando y la sala de accesorios eléctricos son empacadas en cuartos prefabricados separados.

²³ West Japan Engineering Consultants Inc. (2001). *Proyecto de desarrollo Geotérmico Amatitlan*.

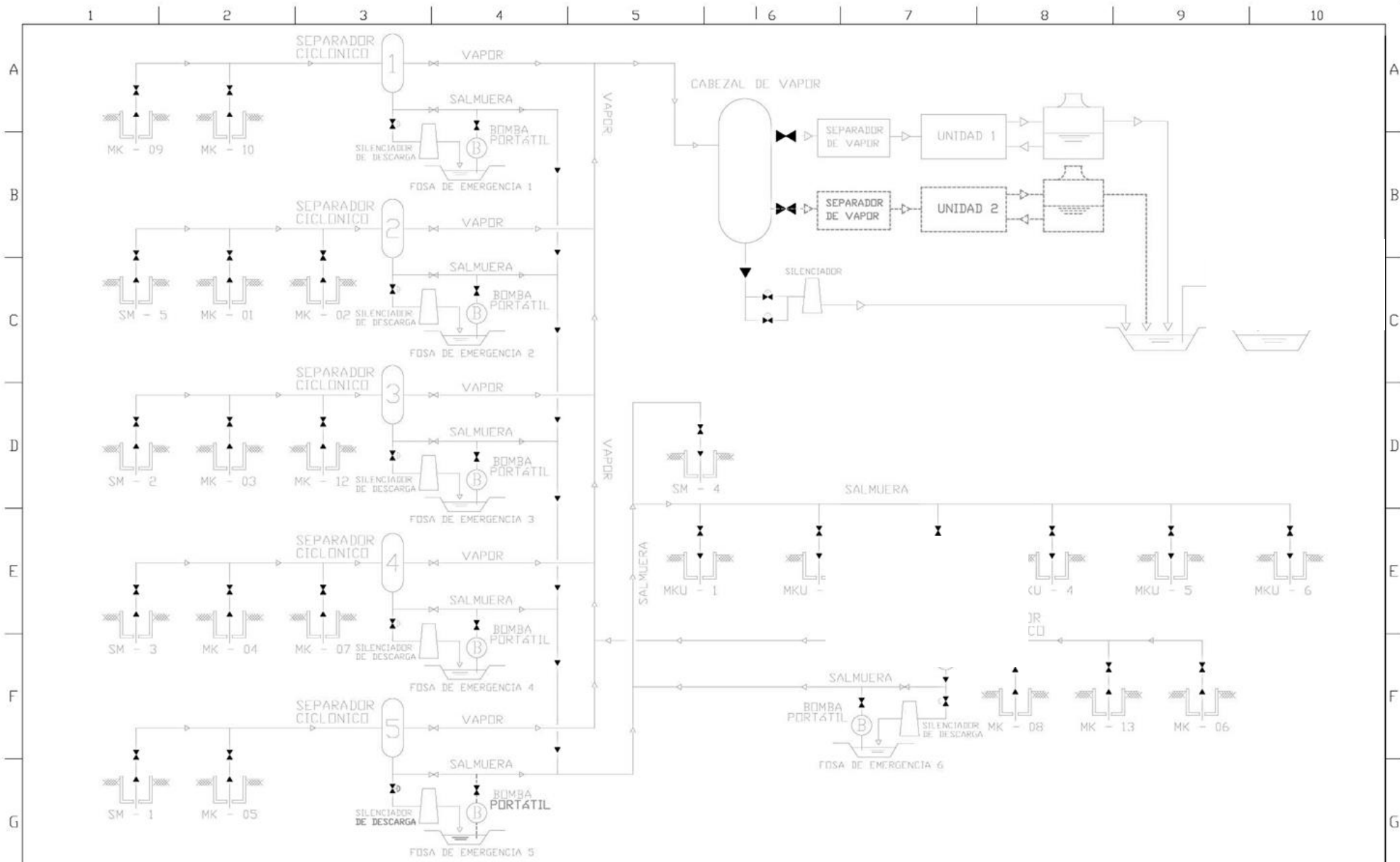


LEYENDA

- | | | | |
|--|----------------------------------|--|-----------------------|
| | PLANTA GEOTERMIELECTRICA | | FUTURO POZO INYECTOR |
| | POZO PERFORADO PRODUCTOR | | SEPARADOR CILINDRICO |
| | POZO PERFORADO INYECTOR | | FOSA DE EMERGENCIA |
| | FUTURO POZO PRODUCTOR | | LINEA DE ALIMENTACION |
| | FUTURO POZO PRODUCTOR DESCARTADO | | LINEA DE VAPOR |
| | | | LINEA DE SALMUERA |
| | | | LINEA DE FALLA |



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES		Ubicación: Laguna Colorada - Potosí	
FACULTAD DE INGENIERIA		Código: Plano: 5.1	
INGENIERIA PETROLERA		Escala: S/E	
Nombre: PROYECTO GEOTERMICO LAGUNA COLORADA		Formato: A2: 594mm x 420mm	
Título del Plano 5.1: Sistema de Reinyección de Fluidos			



LEYENDA

- | | | |
|-------------------------|------------------------|---------------------|
| POZO GEOTERMICO | BOMBA PORTÁTIL | DIRECCION DEL FLUJO |
| SEPARADOR CICLONICO | TORRE DE REFRIGERACION | VALVULA |
| SILENCIADOR DE DESCARGA | FOSA DE EMERGENCIA | VALVULA DE CONTROL |

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES FACULTAD DE INGENIERIA INGENIERIA PETROLERA	Ubicación: Laguna Colorada - Potosí	Código: Plano: 5.2
Nombre: PROYECTO GEOTERMICO LAGUNA COLORADA	Etapa: Diseño para construcción	Escala: S/E
Título del Plano: Diagrama de Recolección de Fluidos y el Sistema de Reinyección		Formato: A3: 420mm x 297mm