



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

**METODOLOGÍA PARA INTEGRACIÓN DE PLANTAS DE POLI-
GENERACIÓN MEDIANTE EL USO EN CASCADA DE LA
ENERGÍA GEOTÉRMICA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

M. en C. Edgar Pastor Martínez

DIRECTOR:

Dr. Ing. Carlos Rubio Maya

CO-DIRECTOR:

Dr. Ing. J. Jesús Pacheco Ibarra

Morelia, Michoacán, México Octubre del 2019

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Mecánica
División de Estudios de Posgrado

Metodología para Integración de Plantas de Poli-generación mediante el
Uso en Cascada de la Energía Geotérmica

Edgar Pastor Martínez

Miembros del Comité Doctoral

Dr. Carlos Rubio Maya

Dr. J. Jesús Pacheco Ibarra

Dra. Alicia Aguilar Corona

Dr. Crisanto Mendoza Covarrubias

Dr. Juan Manuel Belman Flores

Octubre de 2019

Dedicatorias

Dedico esta tesis de investigación a mi esposa Cristina Cuevas, el amor de mi vida y de mi existencia, por iluminar mi vida, con su amor incondicional, cariño, apoyo, paciencia y compañía. Por alegrar mi corazón día con día y hacer con sus detalles que mi ilusión por la vida nunca se apague, por ser mi más valioso tesoro y por ayudarme a alcanzar esté logro tan importante en mi vida.

A mi madre, por ser mi pilar al demostrarme siempre su cariño, apoyo incondicional y darme todo a cambio de nada, además de haberme dado la vida, por siempre confiar en mí y nunca abandonarme. Su ejemplo alimenta mi vida, con esperanza en el sufrimiento cuando hay piedras en el camino y prudencia al saborear las alegrías de la vida que son destellos de luz en eternos tiempos de tinieblas.

A mi abuelita Evangelina quien es el tesoro máspreciado desde mi infancia y que aún hoy atesoro en mi corazón. Y aunque la extraño en todo momento, siento que me acompaña día a día con sus legados y plegarias. Ella jamás morirá en mi corazón, pues tiene el don de la eternidad e inmortalidad.

En la memoria de mi padre, que siempre me dirigió por el camino de la honradez, el respeto y el valor, sus valores los llevo conmigo, perseverancia ¡Trabajando siempre...con tesón! y que soy una persona preparada gracias a él y a mi madre, siento que está conmigo siempre y sé que este momento hubiera sido tan especial para él como lo es para mí.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de investigación:



De igual manera, agradezco el apoyo a la Secretaría de Energía (SENER) y al CeMIEGeo en la participación en el proyecto CONACYT-SENER P16, Fondo sectorial CONACYT-SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA "Integración de una planta de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía geotérmica".



Agradezco infinitamente al Dr. Carlos Rubio Maya por ser un excelente guía y soporte en este trabajo de investigación, y al Dr. J. Jesús Pacheco Ibarra por sus valiosas observaciones.

Al Grupo de Eficiencia Energética y Energías Renovables (GREEN-ER) por el uso de las instalaciones y espacios, así como a sus integrantes que siempre me brindaron su confianza y compañerismo.



Resumen

Factores como el crecimiento en el consumo de energía, el agotamiento de los recursos energéticos y los impactos ambientales asociados, han originado que se busquen alternativas tales como las energías renovables y la integración de sistemas energéticos eficientes. Entre las alternativas con mayor auge, la energía geotérmica de mediana y baja entalpía es un tipo de energía que puede ser utilizada en un esquema más eficiente, mediante la integración en cascada de diversas tecnologías. Debido a lo anterior, en este trabajo se presenta una metodología que permite obtener información de carácter técnico y económico, para determinar las condiciones para diseñar e integrar una planta con el uso en cascada de la energía geotérmica con producción simultánea de electricidad, frío y calor útil. Se presenta primeramente una revisión de los recursos de mediana y baja entalpía existentes en la república mexicana, además del estado del arte en este tipo de sistemas. Se realiza un análisis energético y exergético para determinar los mejores arreglos posibles para el mejor aprovechamiento de los recursos. Se realizó también un análisis técnico-económico utilizando información de fabricantes de sistemas ORC para aplicaciones geotérmicas y presentar una estimación del costo y los beneficios posibles al implementar este tipo de sistemas. Posteriormente se presenta un procedimiento de optimización multi-objetivo del sistema multi-producto, definiendo dos funciones objetivo económicas y otra energética. En particular, la optimización se establece para obtener la combinación de fluidos de trabajo, tecnologías y parámetros que proporcionen el mejor rendimiento exergético del sistema con el menor costo de inversión y mejor VAN. Los resultados para el análisis de las alternativas, permiten determinar el mejor costo-beneficio, dependiendo principalmente del nivel de temperatura del recurso geotérmico. Por otro lado, los resultados del procedimiento de optimización, muestran los valores de las variables de decisión que hacen que el sistema sea viable tanto desde el punto de vista económico, como desde el punto de vista de ahorro de energía.

Palabras Clave

Energía geotérmica, uso en cascada, multi-producto, baja y mediana entalpía, optimización.

Abstract

Factors such as energy consumption growth, energy resources depletion and associated environmental impacts, have led to search alternatives such as renewable energies and efficient energy systems integration. Among alternatives with highest boom, geothermal energy of medium and low enthalpy is a type of energy that can be used in a more efficient scheme, through various technologies and by using a cascade integration. Due to the above, this study presents a methodology that allows obtaining information of a technical and economic nature, in order to determine conditions to design and integrate a plant with cascade use of geothermal energy with simultaneous production of electricity, cold and useful heat. Firstly, a review of medium and low enthalpy resources existing in the Mexican Republic is presented, as well as the state of the art in this type of systems. An energy and exergy analysis is carried out to determine the best possible arrangements for the best use of resources. A technical-economic analysis was also carried out using information from ORC systems manufacturers that have geothermal applications to present an overview of cost and possible benefits when implementing this type of systems. Subsequently, a multi-objective optimization procedure of the multi-product system is presented, defining two economic objective functions and another energy objective function. In particular, optimization is established to obtain working fluids, technologies and parameters combination that provide the best system exergy performance with lowest investment cost and best NPV. The analysis results of the alternatives allow to determine the best cost-benefit, depending mainly on geothermal resource temperature level. On the other hand, optimization procedure results show decision variables values that make the system viable both from the economic point of view and from the point of view of energy saving.

Keywords

Geothermal energy, cascade use, multi-product, low and medium enthalpy, optimization.

Nomenclatura

B	Exergía, [kW].
b	Espaciado de placas; [m].
Bd	Destrucción de exergía, [kW]
CF	Flujo de efectivo, [USD]-
C _{LAT}	Calor latente, [kJ/kg].
COM	Costo de Operación y Mantenimiento, [USD].
C _p	Calor específico a presión constante, [kJ/kg K].
E _{G_{H2O}}	Gastos por agua potable comprada, [USD].
E _{Q_{UDU}}	Energía térmica para usos directos, [kWh].
EW	Energía eléctrica, [kWh].
HPCD	Distancia al centro del puerto horizontal, [m].
I	Costo de inversión, [USD].
i	Tasa de interés, [%].
IN	Ingreso, [USD].
L	Profundidad, [m].
m	Masa, [kg].
<i>m</i>	Flujo másico, [kg/s].
N	Vida útil, [años].
\dot{Q}	Flujo de calor, [kW].
T	Temperatura, [°C].
t	Tiempo, [h].

UC	Costo unitario, [USD].
VAN	valor actual neto, [USD].
VPCD	Distancia al centro del puerto vertical; [m].
\dot{W}	Potencia, [kW].
W	Ancho de la placa, [m].

Subíndices

a	Utilización de energía
Abs	Absorbedor
ADU	Calor disponible para usos directos
ANUAL	Cantidad anual
b	Térmica
CC	Cámara de enfriamiento
Cond	Condensador del ciclo ORC
Conden	Condensador del ciclo de absorción
Cooling	Refrigeración
DU	Usos directos
e	Eléctrica
eff	Efectiva
E	Eléctrico
EL	Electricidad
Eva	Evaporador del ciclo ORC
Evap	Evaporador del ciclo de absorción
ex	Exergética
FR	Congelación

G	Generador eléctrico
Gen	Generador del ciclo de absorción
GEO	Geotérmica
HW	Agua caliente
HX	Intercambiador de calor
I	Primera ley de la termodinámica
ICE	Hielo para consumo humano
ORC	Ciclo Rankine Orgánico
P	Bomba
Rec	Rectificador del ciclo de absorción
T	Turbina
TAR	Refrigeración térmicamente activada
TOT	Total
UDU	Calor útil para usos directos
Valv	Válvula
W	Agua
WELL	Pozo geotérmico

Letras griegas

β	Angulo chevron, [grados].
δ	Espesor de la placa, [m].
ε	Efectividad.
η	Eficiencia [%].
ρ	Densidad, [kg/m ³].

Acrónimos

AIE	Agencia Internacional de Energía
BAE	Bomba de Agua de Enfriamiento
BC	Bomba de Condensado
BI	Bomba de Inyección
C	Condensador
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CHP	Combined Heat and Power
COP	Coefficiente de Rendimiento
E	Evaporador
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
fdt	Tiempos Muertos para la Producción de Hielo
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GWP	Potencial de Calentamiento Global
HE	Medio Efecto
HPS	Hibrido Paralelo-Serie
HSP	Hibrido Serie-Paralelo
HX	Intercambiador de Calor
IAHE	ORC con IHE, Ciclo de Absorción Amoniaco-Agua Medio Efecto
IASE	ORC con IHE, Ciclo de Absorción Amoniaco-Agua Simple Efecto
IBSE	ORC con IHE, Ciclo de Absorción Bromuro de Litio-Agua Simple Efecto
LCOE	Costo Nivelado de la Electricidad, US\$/kW.
ODP	Potencial de Destrucción de la Capa de Ozono

ORC	Ciclo Rankine Orgánico
PC	Cascada en Paralelo
PC	Precalentador
PCR	Precalentador de Recuperación
PI	Pozo Inyector
PP	Pozo Productor
RAHE	ORC Regenerativo, Ciclo de Absorción Amoniaco-Agua Medio Efecto
RASE	ORC Regenerativo, Ciclo de Absorción Amoniaco-Agua Simple Efecto
RBSE	ORC Regenerativo, Ciclo de Absorción Bromuro de Litio-Agua Simple Efecto
RH	Removedor de Humedad
RP	Removedor de Partículas
S	Silenciador
SAHE	ORC Simple, Ciclo de Absorción Amoniaco-Agua Medio Efecto
SASE	ORC Simple, Ciclo de Absorción Amoniaco-Agua Simple Efecto
SBSE	ORC Simple, Ciclo de Absorción Bromuro de Litio-Agua Simple Efecto
SC	Cascada en Serie
SC	Separador Ciclónico
SE	Simple Efecto
TAR	Thermally Activated Refrigeration
TE	Torre de Enfriamiento
T/G	Turbogenerador
VCC	Válvula de Control y Cierre

Índice general

Dedicatorias.....	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Abstract.....	iv
Nomenclatura	v
Acrónimos.....	viii
Lista de tablas	xiii
Lista de figuras.....	xv
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Abastecimiento de la energía a nivel mundial.....	1
1.1.1 Energía renovable	3
1.1.2 Precio del petróleo.....	5
1.1.3 Emisiones de gases de efecto invernadero	6
1.2 La oportunidad de la energía geotérmica.....	7
1.2.1 La necesidad	11
1.3 Usos de la energía geotérmica.....	11
1.3.1 Generación de energía eléctrica.....	12
1.3.2 Usos directos del calor geotérmico.....	16
1.4 Recurso geotérmico en México.....	21
1.4.1 Potencial geotérmico de mediana y baja entalpía en México.....	22
1.5 Justificación y Motivación.....	32
1.6 Objetivos y alcance.....	33
1.6.1 Objetivos Específicos.....	33
1.7 Estructura de la tesis	34
1.8 Comentarios y aspectos destacables.....	35
1.8.1 Identificación de líneas de investigación.....	35
Capítulo 2. Uso en cascada de la energía geotérmica	37
2.1 El concepto del uso en cascada.....	38
2.2 Revisión de aplicaciones.....	39
2.2.1 África.....	40
2.2.2 América.....	41
2.2.3 Asia.....	43
2.2.4 Europa.....	47
2.2.5 Oceanía.....	56
2.3 Beneficios potenciales de un sistema en cascada.....	56
2.3.1 Ciencia y tecnología	56
2.3.2 Ampliación de los recursos humanos expertos en geotermia	56
2.3.3 Beneficios sociales.....	56
2.3.4 Costos de las fuentes de energía geotérmica.....	57
2.3.5 Cambio climático y beneficios para la salud humana.....	58
2.3.6 Creación de empleos en el país	58
2.3.7 Acceso a la energía.....	59
2.3.8 Figuras de propiedad intelectual.....	59
2.4 Conclusiones.....	59

Capítulo 3. Comparación de rendimiento energético y exergético de diferentes arreglos de poli-generación que utilizan energía geotérmica en cascada.....	61
3.1 Introducción.....	61
3.2 Revisión de la literatura	62
3.3 Descripción de los arreglos de poligeneración que trabajan en cascada.....	65
3.3.1 Tecnologías térmicas consideradas para la integración.....	68
3.4 Metodología	70
3.5 Resultados y discusión	76
3.5.1 Comparación de disposiciones de poligeneración (temperatura a 150 ° C)	77
3.5.2 Efecto de la temperatura del recurso geotérmico sobre los arreglos de poligeneración.....	81
3.5.3 Comparación basada en la aplicación de refrigeración para la disposición SC1	84
3.5.4 Enfriamiento para refrigeración / congelación.....	87
3.6 Conclusiones.....	91
Capítulo 4. Integración de plantas de poligeneración por selección de equipos	93
4.1 Introducción.....	93
4.2 Procedimiento de evaluación tecno-económica	94
4.2.1 Descripción del sistema de cascada.....	94
4.2.2 Suposiciones y consideraciones principales	94
4.2.3 Principales componentes y características	95
4.2.4 Modelado energético	97
4.3 Resultados y discusión	101
4.4 Conclusiones.....	105
Capítulo 5. Integración de la planta de poligeneración por diseño de equipos.	107
5.1 Introducción.....	107
5.2 Revisión de la literatura	108
5.3 Descripción del sistema	111
5.3.1 Subsistema ORC.....	111
5.3.2 Subsistemas de refrigeración por absorción	117
5.3.3 Uso térmico del tercer nivel	118
5.4 Metodología	119
5.4.1 Modelado termodinámico	123
5.4.2 Ecuaciones de balances.....	125
5.4.3 Modelado económico.....	126
5.4.4 Marco de Optimización	131
5.5 Resultado y discusión	132
5.6 Discusión y conclusiones.....	148
Capítulo 6. Simulación de la operación de la planta de poli-generación	150
6.1 Introducción.....	150
6.2 Fundamentos de la simulación	150
6.3 Descripción del sistema a simular	151
6.4 Formulación del modelo	151
6.5 Parámetros de entrada y salida de la simulación	155
6.6 Simulación de la operación	157
6.6.1 Parámetros influyentes	158
6.6.2 Validación del modelo.....	160
6.6.3 Modos de operación	162

6.7	Análisis y resultados.....	163
6.7.1	Resultados de la simulación de la planta.....	163
6.7.2	Variación de la temperatura ambiente	165
6.7.3	Operación con un nivel de la cascada – producción eléctrica.....	166
6.7.4	Operación con dos niveles –producción de electricidad y refrigeración	168
6.7.5	Operación con dos niveles – producción de electricidad y deshidratación.....	169
6.7.6	Operación con dos niveles – refrigeración y deshidratación	170
6.7.7	Tablas con resumen de resultados.....	170
6.8	Conclusiones.....	171
	Referencias	172
	Anexo A: Publicaciones y aportes científicos	187

Lista de tablas

Tabla 1. Consumo total de energía comercializada en el mundo en miles de billones de kJ.	2
Tabla 2. Consumo mundial de energías renovables comercializadas por región, 1990- 2030.	4
Tabla 3. Aumentos mundiales de las energías renovables.	5
Tabla 4. Usos directos en función de la temperatura del fluido geotérmico.	17
Tabla 5. Reservas por estado y temperaturas promedio estimadas [21].	24
Tabla 6. Clasificación de recursos geotérmicos con temperaturas menores de 150°C en México.	27
Tabla 7. Zonas susceptibles de aprovechamiento.	27
Tabla 8. Relaciones de energía para el subsistema ORC.	73
Tabla 9. Relaciones de energía para los subsistemas TAR y HX.	74
Tabla 10. Relaciones exergéticas para el subsistema ORC.	75
Tabla 11. Relaciones de exergía para los subsistemas TAR y HX.	75
Tabla 12. Comparación de arreglos de poligeneración para agua caliente a temperaturas de 150 °C, 110 °C y 80 °C.	79
Tabla 13. Flujo másico, temperaturas de entrada y salida de los componentes de los arreglos de poligeneración para agua caliente a temperaturas de 150 °C, 110 °C y 80 °C.	80
Tabla 14. Sub-clasificación basada en variaciones de las tecnologías térmicamente activadas.	84
Tabla 15. Arreglo SC1 basado en aplicación de aire acondicionado (temperatura de entrada a 150 °C, 110 °C, 100 °C y 80 °C).	88
Tabla 16: Máquinas ORC consideradas en el esquema de evaluación.	96
Tabla 17: Resultados de energía y económicos para el sistema geotérmico en cascada optimizado.	102
Tabla 18. Fluidos de trabajo considerados para ciclos ORC subcríticos y supercríticos.	115
Tabla 19. Parámetros fijos del sistema y variables de decisión.	122
Tabla 20: Parámetro de diseño del valor U para cada unidad de intercambiador de calor.	124
Tabla 21. Relaciones energéticas del subsistema ORC del sistema de poligeneración.	125
Tabla 22. Relaciones energéticas de los subsistemas TAR y DH de los arreglos de poligeneración.	125
Tabla 23. Clasificación de estimaciones de costo capital [217,218].	127
Tabla 24. Correlaciones de costo para los equipos	128
Tabla 25. Variables de decisión	131
Tabla 26. Resumen de sistemas óptimos para temperaturas de recursos geotérmicos de 150 °C, 110 °C y 90 °C.	130 147
Tabla 27. Relaciones de energía de la planta de poli-generación.	153
Tabla 28. Relaciones exergéticas para la planta de poli-generación.	154
Tabla 29. Condiciones requeridas en el diseño de la planta de poli-generación.	155
Tabla 30. Datos de entrada de la simulación.	156
Tabla 31. Datos de salida de la simulación.	157
Tabla 32. Comparativo del modelo de simulación ORC con el modelo de agua caliente de alta y baja temperatura HANPOWER ORC.	161
Tabla 33. Comparativo del modelo de simulación TAR con el modelo de absorción de LiBr/H ₂ O de simple efecto para agua caliente de alta y baja temperatura: HAU - H/L - N.	161
Tabla 34. Cargas parásitas de la planta en modo 1.	167
Tabla 35. Parámetros de funcionamiento de la planta en modo 1.	167
Tabla 36. Cargas parásitas de la planta en modo 2.	168
Tabla 37. Parámetros de funcionamiento de la planta en modo 2.	168

Tabla 38. Cargas parásitas de la planta en modo 3.	169
Tabla 39. Parámetros de funcionamiento de la planta en modo 3.	169
Tabla 40. Comparativo de cargas parásitas de la planta.	170
Tabla 41. Comparativo de parámetros de la planta.	170

Lista de figuras

Figura 1. Consumo total de energía comercializada.	1
Figura 2. Proporciones de los combustibles respecto a la disponibilidad mundial de energía primaria.	3
Figura 3. Emisiones de gases de efecto invernadero por sector.	6
Figura 4. Temperaturas de las capas de la tierra.	7
Figura 5. Lugares con mayor actividad geotérmica alrededor del mundo.	8
Figura 6. Formación de un depósito geotérmico.	8
Figura 7. Diagrama de Lindal de temperatura adecuada de vapor y agua geotérmica para varias aplicaciones.	12
Figura 8. Esquema de un ciclo directo sin condensación.	13
Figura 9. Esquema de una planta simple-flash.	13
Figura 10. Esquema de una planta doble-flash.	14
Figura 11. Esquema de un ciclo Rankine orgánico.	15
Figura 12. Esquema de un ciclo Kalina.	16
Figura 13. Spa situado en Erding Alemania.	18
Figura 14. Suministro de ACS a edificios mediante energía geotérmica.	19
Figura 15. Diversas formas de empleo de calor en invernaderos.	19
Figura 16. Criadero piscícola climatizado con energía geotérmica.	20
Figura 17. Complejo industrial de Kawerau, Bahía de Plenty. Nueva Zelanda.	21
Figura 18. Mapa nacional de recursos geotérmicos.	23
Figura 19. Distribución geográfica de las 276 localidades geotérmicas en México.	24
Figura 20. Mapa de recursos geotérmicos y zonas de exploración.	25
Figura 21. Localización de las manifestaciones termales y la ubicación de los campos geotérmicos.	25
Figura 22. Mapa base y en recuadro acercamiento mayor a la zona de Los Azufres.	26
Figura 23. Ubicación de zonas geotérmicas susceptibles de aprovecharse para generación distribuida, autoabastecimiento y cogeneración en México.	28
Figura 24. Localización de las 20 zonas geotérmicas seleccionadas [25].	29
Figura 25. Esquema conceptual del uso en cascada de la energía geotérmica.	38
Figura 26. Esquema conceptual de un sistema de poli-generación.	39
Figura 27. Esquema conceptual de una Villa Geotérmica a desarrollarse en Samburu, Kenia [14].	40
Figura 28. Sistema esquemático del proyecto Camby, California [57].	43
Figura 29. Sistema en cascada con ciclo Kalina y producción de petróleo crudo, [64].	45
Figura 30. Diagrama del sistema en cascada basado en KC, [65].	45
Figura 31. Producción en cascada de electricidad y frío, [66].	46
Figura 32. Esquema del funcionamiento de Geiberg, adaptada de [82].	48
Figura 33. Ampliación del uso de calor geotérmico para Husavik, adaptada de [89].	49
Figura 34. Húsavik, diagrama del uso múltiple de la energía geotérmica.	50
Figura 35. Planta Nesjavellir que suministra electricidad y calefacción de distrito a la ciudad de Reykjavik, [92].	51
Figura 36. Disposición de los usos en cascada del agua geotérmica en la Universidad de Oradea, tomada de [98].	53
Figura 37. Diagrama de la instalación existente y perspectivas, tomada de [98].	53
Figura 38. Diagrama de bloques del centro termal de la planta piloto, usando bombas de calor.	54

Figura 39. Sistema integrado mediante recurso geotérmico, tomada de [103].	55
Figura 40. Esquemas simbólicos del sistema en cascada.	67
Figura 41. Alternativas del subsistema ORC.	68
Figura 42. Subsistemas de enfriamiento por absorción.	69
Figura 43. Metodología adoptada para comparación de los arreglos en cascada	71
Figura 44. Eficiencia exergetica de los arreglos de poligeneración basada a 150 °C de temperatura.	77
Figura 45. Diagrama de Sankey para la configuración SC1 operando a 150 °C.	78
Figura 46. Diagrama de Grassmann para el SC1 trabajando a temperatura de 150 °C.	78
Figura 47. Eficiencia térmica vs temperatura del recurso geotérmico.	81
Figura 48. Eficiencia de utilización vs temperatura del recurso geotérmico.	82
Figura 49. Eficiencia exergetica vs temperatura del recurso geotérmico.	83
Figura 50. Potencia y enfriamiento vs temperatura del recurso geotérmico.	84
Figura 51. Eficiencia térmica vs temperatura el recurso geotérmico (aire acondicionado).	85
Figura 52. Eficiencia de utilización vs temperatura del recurso geotérmico.	86
Figura 53. Eficiencia exergetica vs temperatura del recurso geotérmico.	86
Figura 54. Productos de la poligeneración vs temperatura del recurso geotérmico (aire acondicionado).	87
Figura 55. Eficiencia térmica vs temperatura del recurso geotérmico.	89
Figura 56. Eficiencia de utilización vs temperatura del recurso geotérmico.	89
Figura 57. Eficiencia exergetica vs temperatura del recurso geotérmico.	90
Figura 58. Productos vs temperatura del recurso geotérmico (refrigeración).	90
Figura 59. Esquema conceptual de un sistema en cascada de tres niveles.	95
Figura 60. VAN del sistema en cascada para diferentes ORC's.	104
Figura 61. Eficiencia térmica global del sistema en cascada para diferentes ORC's.	104
Figura 62. Periodo simple de retorno del sistema en cascada para diferentes ORC's.	105
Figura 63. Esquema del sistema utilizando TAR de simple efecto.	112
Figura 64. Esquema del sistema utilizando TAR de medio efecto.	113
Figura 65. Alternativas del subsistema ORC.	113
Figura 66. Diagrama T-s a) ORC subcritico y b) ORC supercritico.	114
Figura 67. Diagrama T-s para fluidos (a) húmedos, (b) isentrópicos y (c) secos.	115
Figura 68. Matriz de decisión para la selección del fluido de trabajo.	116
Figura 69. Subsistemas de enfriamiento por absorción.	117
Figura 70. Geometría del intercambiador de calor de placas tipo Chevron.	118
Figura 71. Esquema del deshidratador de jitomate [209].	118
Figura 72. Metodología adoptada para la optimización multi-objetivo.	120
Figura 73. Efecto del pinch-point del evaporador en la eficiencia exergetica y el costo de inversión.	133
Figura 74. Efecto del sobrecalentamiento en el subsistema ORC en la eficiencia exergetica y el (SIC).	133
Figura 75. Frente de Pareto de costo de inversión vs potencia neta de salida de ciclos supercríticos y subcríticos.	134
Figura 76. Costo especifico de inversión vs temperatura del recurso geotérmico.	135
Figura 77. Eficiencia exergetica vs VAN, $\Delta T_{ORC}=60$ °C y recurso geotérmico a 150 °C.	136
Figura 78. Eficiencia exergetica vs costo de inversión, $\Delta T_{ORC}=60$ °C y recurso geotérmico a 150 °C.	136
Figura 79. Eficiencia exergetica vs VAN, $\Delta T_{ORC}=50$ °C y recurso geotérmico a 150 °C.	137
Figura 80. Eficiencia exergetica vs costo de inversión, $\Delta T_{ORC}=50$ °C y recurso geotérmico a 150 °C-	138
Figura 81. Eficiencia exergetica vs VAN, $\Delta T_{ORC}=40$ °C y recurso geotérmico a 150 °C.	138
Figura 82. Eficiencia exergetica vs costo de inversión, $\Delta T_{ORC}=40$ °C y recurso geotérmico a 150 °C.	139

Figura 83. Eficiencia exergética vs VAN, $\Delta T_{ORC}=30$ °C y recurso geotérmico a 150 °C.	140
Figura 84. Eficiencia exergética vs costo de inversión, $\Delta T_{ORC}=30$ °C y recurso geotérmico a 150 °C.	140
Figura 85. Eficiencia exergética vs VAN con recurso geotérmico a 150 °C.	141
Figura 86. Eficiencia exergética vs costo de inversión con recurso geotérmico a 150 °C.	142
Figura 87. Eficiencia exergética vs VAN con recurso geotérmico a 130 °C.	142
Figura 88. Eficiencia exergética vs costo de inversión con recurso geotérmico a 130 °C.	143
Figura 89. Eficiencia exergética vs VAN con recurso geotérmico a 110 °C.	144
Figura 90. Eficiencia exergética vs costo de inversión con recurso geotérmico a 110 °C.	145
Figura 91. Eficiencia exergética vs VAN con recurso geotérmico a 90 °C.	145
Figura 92. Eficiencia exergética vs costo de inversión con recurso geotérmico a 90 °C.	146
Figura 93. Diagrama de flujo del sistema para identificación de flujos y equipos.	152
Figura 94. Diagrama de flujo del sistema para simulación.	153
Figura 95. Diagrama del programa de simulación temperatura recurso geotérmico.	159
Figura 96. Operación de la torre de enfriamiento de la planta.	159
Figura 97. Diagrama del programa de simulación temperatura ambiente.	160
Figura 98. Comportamiento del ORC con variación de la temperatura del flujo geotérmico.	163
Figura 99. Comportamiento de la máquina de absorción para diferente temperatura del flujo geotérmico.	164
Figura 100. Comportamiento del sistema de deshidratación para diferente temperatura del flujo geotérmico.	164
Figura 101. Comportamiento del ORC con variación de la temperatura ambiente.	165
Figura 102. Comportamiento del enfriamiento con variación de la temperatura ambiente.	166
Figura 103. Comportamiento del sistema de deshidratación con la temperatura ambiente.	166
Figura 104. Diagrama de la planta en modo 1.	167
Figura 105. Diagrama de la planta en modo 2.	168
Figura 106. Diagrama de la planta en modo 3.	169

Capítulo I. Introducción

1.1 Abastecimiento de la energía a nivel mundial

La demanda de energía y de servicios, con miras al desarrollo social, económico y a mejorar el bienestar y la salud de las personas, va en aumento día con día. Todas las sociedades necesitan de servicios energéticos para cubrir sus necesidades básicas. De acuerdo a la AIE [1], se espera que la demanda de energía aumente considerablemente en los próximos años a causa del crecimiento demográfico y el desarrollo económico. Los mayores incrementos en la demanda de energía se registrarán en los países en desarrollo, donde se pronostica que la proporción mundial del consumo de energía habrá de aumentar del 46 al 58 % para el 2030 [1]. Según las proyecciones, el consumo de energía en los países en desarrollo crecerá a un ritmo promedio anual del 3 por ciento hasta el 2020. En los países industrializados con economías maduras y un crecimiento demográfico previsible relativamente escaso, la demanda proyectada de energía crecerá a un ritmo más bajo 0.9 por ciento anual, pero partiendo de un nivel mucho más alto. El consumo de energía en las regiones en desarrollo superará, según las proyecciones, al de las regiones industrializadas para 2010. La generación de energía eléctrica representará alrededor de la mitad del incremento de la demanda mundial de energía, y el transporte supondrá un quinto de esa demanda, que en su mayor parte será de combustibles petrolíferos [1]. Una gran proporción del aumento de la demanda de energía resultará del rápido crecimiento de las economías asiáticas, especialmente China y la India. La Figura 1, muestra el consumo total de energía comercializada en los países pertenecientes y no pertenecientes a la OCDE para 1990-2030.

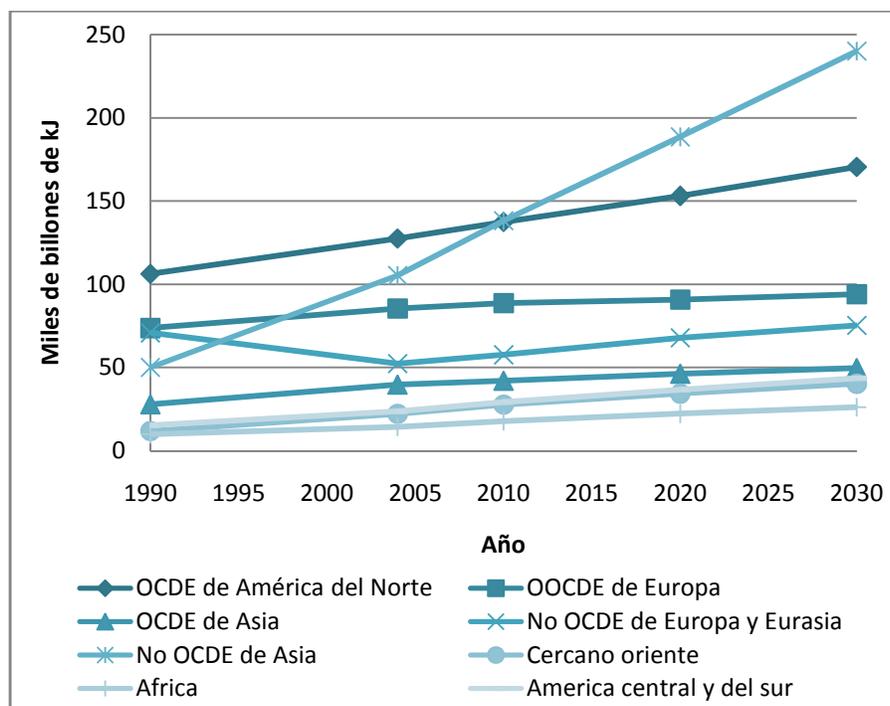


Figura 1. Consumo total de energía comercializada.

El consumo de energía en Asia se duplicará durante los próximos 20 años, representando alrededor del 65 % del incremento total de la demanda de energía de todos los países en desarrollo. Pese a que se espera que el consumo de energía en los países en desarrollo de otras regiones crezca a un ritmo más lento que en Asia, se prevé que las tasas de crecimiento excederán el promedio mundial. La Tabla 1 muestra el consumo de energía comercializada en el mundo, por región y tipo de combustible.

La mayor parte de la energía mundial se genera a partir de fuentes no renovables, especialmente petróleo, carbón y gas. La Figura 2 muestra las proporciones de los combustibles respecto a la disponibilidad mundial de energía primaria. Tan sólo el 13 por ciento de la energía mundial proviene de fuentes renovables, y el 10.6 por ciento de éstas son fuentes renovables de combustibles y desechos urbanos renovables. El resto de las energías renovables son la hídrica, geotérmica, solar, eólica y maremotriz. Las proyecciones relativas al consumo mundial de energía total muestran que, la mayor parte del incremento corresponderá a los combustibles fósiles, y que la energía nuclear y de otras fuentes registrará aumentos relativamente menores en cifras absolutas. En porcentaje, el gas y el carbón registrarán probablemente los cambios más importantes, aumentando 65 y 74 por ciento respectivamente. Se espera que el consumo de petróleo aumente un 42 %, mientras que la energía nuclear y las energías renovables, que partirán de niveles mucho más bajos, aumentarán, un 44 y un 61 % respectivamente. Los aportes definitivos de las diferentes fuentes de energía dependerán en gran medida de las orientaciones políticas.

Tabla 1. Consumo total de energía comercializada en el mundo en miles de billones de kJ.

Región	Año					Aumento porcentual anual, 2004-2030
	1990	2004	2010	2020	2030	
Países de América del Norte pertenecientes a la OCDE	106.35	127.56	137.47	153.09	170.50	1.1
Países de Europa pertenecientes a la OCDE	73.75	85.57	88.73	90.84	94.11	0.4
Países de Asia pertenecientes a la OCDE	28.06	39.88	42.10	46.32	49.80	0.9
Países de Europa y Eurasia no pertenecientes a la OCDE	70.90	52.44	57.71	67.95	75.44	1.4
Países de Asia no pertenecientes a la OCDE	50.12	105.40	138.21	188.64	240.13	3.2
Cercano Oriente	11.92	22.26	27.75	34.39	40.30	2.3
África	10.02	14.45	17.83	22.37	26.27	2.3
América Central y del Sur	15.30	23.74	29.23	36.72	43.68	2.4
Total de países pertenecientes a la OCDE	208.27	253.00	268.41	290.25	314.41	0.8
Total de países no pertenecientes a la OCDE	158.26	218.29	270.73	350.17	425.72	2.6
Tipo de combustible						
Petróleo	143.70	177.46	194.03	22.79	252.05	1.4
Gas natural	79.34	109.09	127.24	55.09	179.78	1.9
Carbón	94.32	120.80	1143.91	176.41	210.06	2.2

Nuclear	21.52	29.01	31.44	37.67	41.89	1.4
Otros	27.64	35.03	42.62	49.06	56.45	1.9
TOTAL MUNDIAL	366.42	471.30	539.24	640.42	740.23	1.8

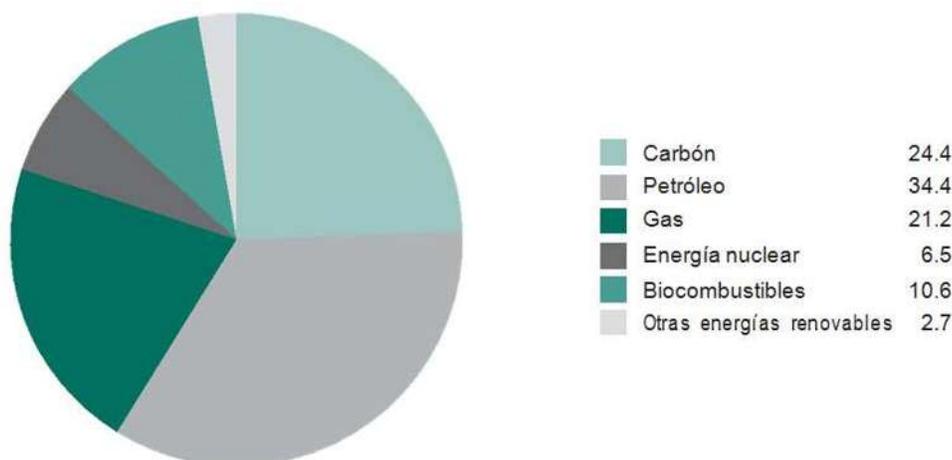


Figura 2. Proporciones de los combustibles respecto a la disponibilidad mundial de energía primaria.

1.1.1 Energía renovable

La energía renovable consiste en energía que es producida o se deriva de fuentes que se renuevan indefinidamente, tales como en el caso de la energía hídrica, solar y eólica, o de fuentes producidas de forma sostenible, tales como la biomasa. A pesar de los pronósticos acerca de los combustibles fósiles, se espera que el uso de las energías renovables registre un aumento. El crecimiento de las energías renovables será de alrededor del 1.9 por ciento anual durante las próximas décadas [1]. Los aumentos absolutos mayores se esperan en América del Norte, los países en desarrollo de Asia y en América Central y del Sur.

La Tabla 2, muestra los pronósticos en los aumentos en el consumo de energías renovables. Se pronostica que los mayores aumentos en el consumo de energías renovables se registrarán en el Cercano Oriente, los países en desarrollo de Asia y en América Central y del Sur. En los países asiáticos en desarrollo, esta tendencia se deberá más al aumento de los consumos de energía que a un interés particular por las energías renovables, como es el caso en América Central y del Sur.

En la mayor parte de las regiones del mundo se espera que la proporción de la energía proveniente de fuentes renovables comercializadas aumente en los próximos años. La mayor proporción del consumo total de energía renovable se registrará con mucho en América Central y del Sur, donde las fuentes de energía no fósiles competitivas económicamente ya están bien implementadas.

Los factores que determinarán la competitividad de las fuentes de energía renovables serán los precios más altos de los combustibles fósiles y las políticas y programas gubernamentales en apoyo del desarrollo de las energías alternativas. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos internacionales desplegados, los pronósticos no indican que la proporción de la energía renovable vaya a aumentar significativamente a nivel mundial: un incremento escaso del 7.4 - 7.6 % es todo lo que se espera en 2030 [1].

La Tabla 3 muestra una proyección de la posible evolución del mercado mundial de la energía si, a nivel mundial, los países decidieran adoptar las políticas y disposiciones que están actualmente en estudio para la reducción de las emisiones de carbono y mejorar la seguridad del suministro de energía. Conforme a esta hipótesis, la proporción de las energías renovables en el consumo mundial de energía se mantendrá en buena parte invariable, mientras que la proporción de biomasa tradicional disminuirá. La producción de energía hidroeléctrica aumentará, pero su proporción se mantendrá estable, mientras que las proporciones de otras energías renovables (incluida la geotérmica, la solar y la eólica) serán las que más rápidamente aumenten, pero partiendo de niveles tan bajos que dichas energías seguirán constituyendo el componente más pequeño de las renovables en 2030.

Incluyendo la biomasa tradicional, la calefacción y la cocción de los alimentos seguirán siendo los usos principales de los combustibles renovables durante los próximos 25 años. El sector de la energía eléctrica, será, según lo esperado, el factor que impulse el incremento mundial del consumo de energía renovable. Este sector representó el 25 % del consumo mundial de energía renovable en 2002, y su proporción proyectada aumentará al 38 por ciento para el 2030. En la actualidad, menos del 1 % de los combustibles usados en el transporte son renovables. Según las proyecciones, esta proporción alcanzará el 3 % durante los próximos 25 años. Las repercusiones generales de estos cambios en el consumo mundial de energía serán relativamente leves, pero podrán ser considerables en la deforestación y en la seguridad alimenticia.

Tabla 2. Consumo mundial de energías renovables comercializadas por región, 1990- 2030.

Región	Año					Aumento porcentual anual, 2004-2030
	1990	2004	2010	2020	2030	
Países de América del Norte pertenecientes a la OCDE	9.5	9.9	12.2	13.1	14.4	1.5
Países de Europa pertenecientes a la OCDE	4.8	6.3	6.9	7.5	8.0	0.9
Países de Asia pertenecientes a la OCDE	1.6	1.7	1.9	2.1	2.3	1.2
Países de Europa y Eurasia no pertenecientes a la OCDE	2.8	2.9	3.6	4.3	4.9	2.0
Países de Asia no pertenecientes a la OCDE	3.0	5.7	7.0	9.1	11.3	2.7
Cercano Oriente	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	4.3
África	0.6	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4
América Central y del Sur	3.9	5.6	7.4	9.1	11.0	2.6
Total de países pertenecientes a la OCDE	15.9	17.9	21.1	22.7	24.7	1.2
Total de países no pertenecientes a la OCDE	10.3	15.3	19.3	23.9	28.8	2.5
TOTAL MUNDIAL	26.2	33.2	40.4	46.5	53.5	2.5

La energía renovable representa, en los países en desarrollo, una proporción mayor de los suministros totales de energía que en los países desarrollados. Alrededor del 75 % de la energía renovable se consume en los países en desarrollo, y en ellos la mayor parte de la producción de energía renovable se basa en el uso tradicional de biomasa y en la energía hidroeléctrica. Los países industrializados representan el 23 % del consumo mundial de energía renovable; y las economías en transición, el 3 %.

Las opciones energéticas futuras dependerán de múltiples factores. La importancia de las diferentes fuentes de energía variará según los objetivos principales de las políticas energéticas. Las diferencias en las emisiones de carbono son importantes en relación con el cambio climático, mientras que la localización de los suministros es importante en relación con la dependencia energética. Los precios futuros de los combustibles fósiles y el alcance de las iniciativas destinadas a proporcionar fuentes alternativas de combustibles son factores de vital importancia para el futuro del consumo de energía. La importancia que se dé a cada uno de estos factores y el grado de competencia entre los diferentes objetivos políticos determinarán en gran medida el futuro del consumo de energía.

Tabla 3. Aumentos mundiales de las energías renovables.

Tipo de energía	2004	2030	Aumento aproximado (veces)
Generación de energía eléctrica (TWh)	3 179	7 775	>2
Energía hidroeléctrica	2 810	4 903	<2
Biomasa	227	983	>4
Energía eólica	82	1 440	18
Energía solar	4	238	60
Energía geotérmica	56	185	>3
Energía maremotriz	<1	25	46
Biocombustibles (millones de toneladas de equivalente de petróleo)	15	147	10
Industria y construcción (millones de toneladas de equivalente de petróleo)	272	539	2
Biomasa comercial	261	450	<2
Calor solar	6,6	64	10
Calor geotérmico	4,4	25	6

1.1.2 Precio del petróleo

Es probable que el precio del petróleo y de otros combustibles fósiles condicione considerablemente la implementación de las energías renovables. La baja de los precios no estimulará a los responsables de las políticas a promover las energías renovables, aunque en los países en desarrollo, en particular, el aumento de los precios del petróleo y el estancamiento del crecimiento económico puedan también impedir las inversiones en energías renovables.

Con respecto a las energías renovables, los países en desarrollo son particularmente sensibles a las fluctuaciones de la oferta y demanda mundiales de energía. La Agencia Internacional de Energía estima que una subida de 10 dólares del precio del petróleo puede acarrear una reducción promedio del 0.8

por ciento del producto interno bruto (PIB) en Asia, y de hasta un 1.6 % en los países más pobres y muy endeudados de la región. Los efectos del precio del petróleo en el desarrollo de las energías renovables y en la distribución mundial de su consumo serán complejos, y los problemas del comercio y la transferencia de tecnología serán de gran importancia.

1.1.3 Emisiones de gases de efecto invernadero

Uno de los problemas más importantes en la producción de energía son las emisiones de gases de efecto invernadero. Otras fuentes, como el cambio del uso de la tierra y las actividades forestales y agrícolas, suponen cerca de una tercera parte de las emisiones producidas. Sin embargo, entre los factores asociados a las emisiones, el uso de los combustibles fósiles es el que ejerce la mayor influencia en el clima, estimándose que representa el 56.6 por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero [2]. La Figura 3 muestra la proporción de los principales contribuyentes de emisiones de carbono.

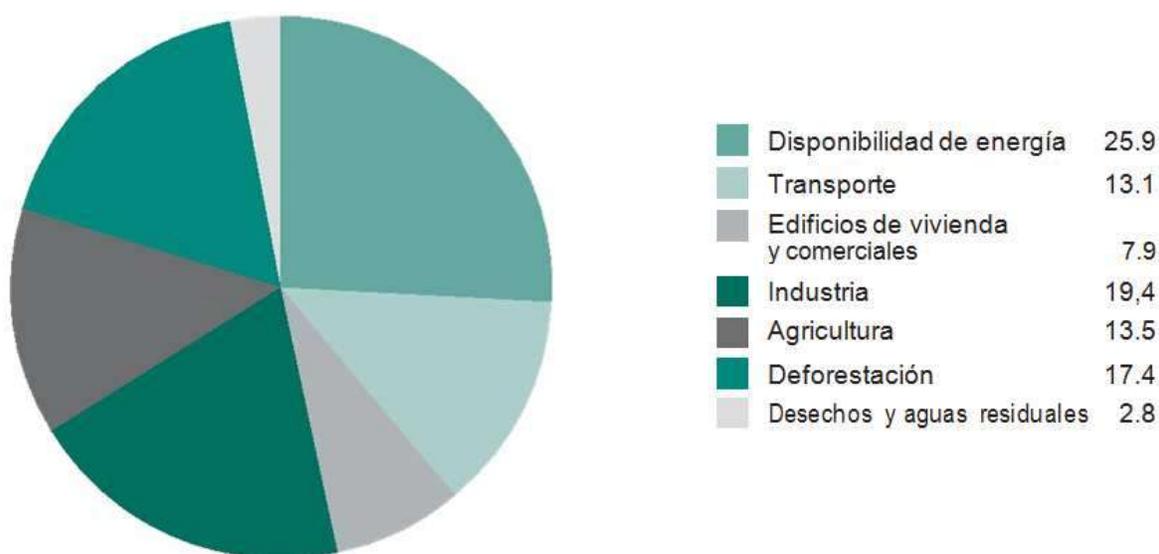


Figura 3. Emisiones de gases de efecto invernadero por sector.

El transporte, que tan sólo contribuye con la octava parte de las emisiones producidas, ha llegado a ocupar un lugar central en el debate sobre la bioenergía, debido a la gran cantidad de carbono que liberan los medios de transporte, la relevancia que en la opinión pública tienen los precios del petróleo y la dependencia respecto de las naciones productoras.

A pesar de la importancia que le ha dado al petróleo y al transporte en los últimos años, no es posible pasar por alto la trascendencia del carbón en el uso futuro de la energía y el papel que juega el carbón en el cambio climático, especialmente si se llega a difundir el uso de la gasificación del carbono para la producción de los combustibles de transporte [3]. El carbón, que es con mucho el combustible fósil más contaminante, ha cobrado también una importancia creciente especialmente en Asia, que particularmente es el continente en el que se predicen los mayores aumentos en la demanda de energía. De todos los combustibles fósiles, el carbón es el que más ha contribuido a los gases causantes del cambio climático, habiendo superado en este aspecto al petróleo en 2003. El carbón proporciona una proporción análoga al petróleo de la energía mundial total en forma de gas, pero emite el doble de dióxido de carbono.

A pesar de la legislación en materia medioambiental, y dado que el suministro de carbón no tiene las limitaciones que afectan al petróleo, parece inevitable que la proporción de la energía procedente del carbón deba registrar un aumento. Las reservas carboníferas se encuentran más dispersas que las de petróleo y de gas. Existen grandes reservas de carbón adecuadas para la generación de energía en Australia, China, Colombia, la India, Indonesia, la Federación de Rusia, Sudáfrica y los Estados Unidos de América. Las proyecciones del uso del carbón apuntan a aumentos considerables en Asia y el Pacífico. China y la India juntas protagonizarán alrededor de tres cuartos del aumento de la demanda de carbón en los países en desarrollo, y dos tercios del aumento de la demanda mundial de carbón.

1.2 La oportunidad de la energía geotérmica

La energía geotérmica es una fuente de energía renovable, limpia y de bajo costo una vez que se ha superado la etapa de la inversión inicial, con el uso de una fuente de energía limpia, no sólo se hace frente a los problemas de los costos, también son considerados los impactos ambientales de la producción y procesamiento de alimentos. Los elementos radiactivos dentro de la tierra liberan calor a temperaturas muy elevadas, que aumentan en función de la distancia de la superficie de la tierra (Figura 4). La temperatura del núcleo de la Tierra se estima alrededor de 5000 °C, y el núcleo externo es de aproximadamente 4 000 °C - una temperatura similar a la de la superficie del sol. El flujo constante de energía térmica de interior de la Tierra, lo que equivale a un estimado de 42 millones de megawatts (MW) de potencia, se espera que continúe durante miles de millones de años [4].

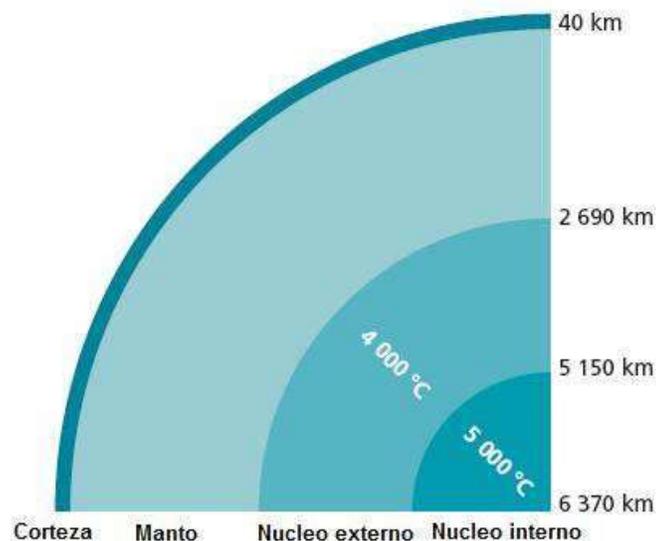


Figura 4. Temperaturas de las capas de la tierra.

La actividad geotérmica se concentra alrededor del Océano Pacífico y la Placa del Pacífico (Figura 5), en el "anillo de fuego" que se extiende desde Indonesia, Filipinas y Japón, hasta Alaska, América Central, México, los Andes y Nueva Zelanda.



Figura 5. Lugares con mayor actividad geotérmica alrededor del mundo.

La energía geotérmica por lo general se mantiene bajo tierra, pero a veces alcanza la superficie en forma de aguas termales y géiseres, volcanes y fumarolas o agujeros creados cuando los gases volcánicos son liberados, particularmente en los campos geotérmicos de alta temperatura ubicados a lo largo de los límites de las principales placas.

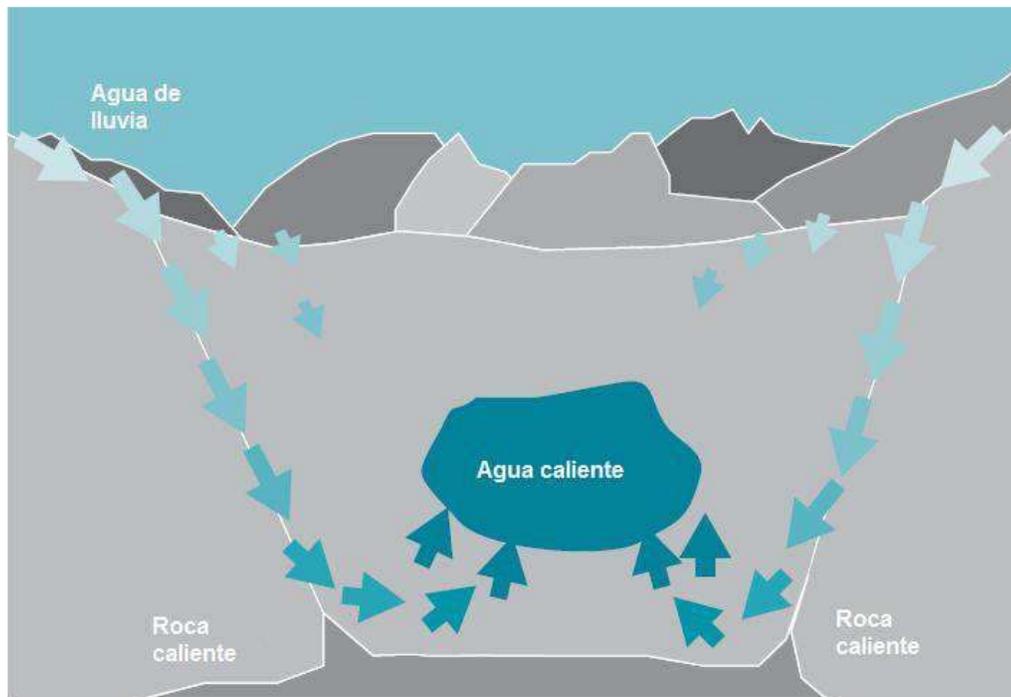


Figura 6. Formación de un depósito geotérmico.

Una fuente importante de explotación de la energía geotérmica son los depósitos que se forman de forma subterránea cuando el agua pluvial es atrapada a largo de las fallas, fracturas en la roca y roca porosa, esta agua es calentada por el magma que ha sido empujado hacia arriba desde el núcleo de la Tierra (Figura 6). Los geólogos en busca de estos recursos hidrotermales por lo general tienen que perforar pozos profundos para encontrar los depósitos.

Este tipo de energía no es nuevo pero actualmente existe en el mundo un mayor interés en utilizar este recurso. El mayor interés por las energías limpias, provoca que haya un auge importante de este tipo de energía. Las ventajas más importantes que tienen es que es un recurso renovable, brinda un flujo constante de energía, casi no emite contaminación y requiere de poco espacio para instalar una planta geotérmica. Las desventajas que tiene esta fuente es que solo en determinadas áreas del planeta existen zonas calientes o geográficas aptas para producir energía mediante esta forma y el costo de construcción es elevado. En el mundo existen más de 250 plantas geotérmicas y existen diversos proyectos o plantas en construcción en todo el mundo debido a que este tipo de fuente ayuda notablemente a incrementar la capacidad energética total de los países. El recurso geotérmico puede ser un recurso muy interesante para los países en vías de desarrollo para poder obtener energía ya que gran parte de las zonas del planeta que tienen cualidades geotérmicas pertenece a países subdesarrollados en especial en África, Asia y partes de Sudamérica tienen un gran potencial. La energía geotérmica está aumentando la capacidad energética de grandes regiones del mundo y de países como por ejemplo China brindándole acceso a la electricidad a millones de personas. Es ideal combinar las plantas geotérmicas con otros tipos de fuentes alternativas para poder aumentar los recursos energéticos. Utilizar las fuentes alternativas con responsabilidad ayudara notablemente a evitar problemas ambientales y sociales.

Por otra parte la agricultura consume energía y también emite gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. Dentro de las áreas de oportunidad de esta energía sugiere que el uso de la calefacción geotérmica para invernaderos disminuye las infecciones de hongos y reduce los costos de combustible hasta en un 80 por ciento, lo que supone un ahorro importante para los presupuestos de explotación. La energía geotérmica para la agricultura puede aprovecharse incluso en pequeña escala y contribuir significativamente a la generación de ingresos, la creación de empleo y la mejora de la seguridad alimentaria y nutricional en los países en desarrollo.

A nivel mundial, 38 países aplican actualmente la energía geotérmica en la producción agrícola y aproximadamente 24 países la aprovechan para generar electricidad, con Islandia, Costa Rica, El Salvador, Kenia, Nueva Zelanda y Filipinas cubriendo más del 10 por ciento de sus necesidades de electricidad con fuentes naturales de calor. De los 23 países en desarrollo que utilizan la energía geotérmica, la mayoría la destina actualmente a calentar espacios y a fines recreativos como balnearios, sin explotar aun su importante potencial para usos directos con fines agrícolas.

Los costos iniciales siguen siendo el principal obstáculo para que los países en desarrollo exploren el uso de energía geotérmica a una escala mayor, lo que hace aún más necesario que los gobiernos asuman un papel de liderazgo en la atracción de inversiones y la creación de entornos normativos de apoyo al sector, según la FAO [5].

El principal elemento que lleva a desarrollar un proyecto de generación de electricidad y usos directos a partir de energía geotérmica de mediana y baja entalpía es la oportunidad que ofrece un conjunto de factores que se enumeran a continuación.

- **Presencia de recursos de energía geotérmica de mediana y baja entalpía.** Un factor clave en la oportunidad de desarrollar proyectos de generación eléctrica y usos no eléctricos a partir de energía geotérmica de mediana y baja entalpía es, básicamente, la disponibilidad de este recurso, que por las condiciones geológicas de muchas zonas en el mundo y en particular México existe una gran posibilidad de su presencia.

- **El marco legal.** Para el desarrollo de este tipo de proyectos, es determinante el marco legal, el cual permite la generación por parte de actores privados en varias modalidades en todas las regiones del mundo. En México de acuerdo con la reforma energética [6], el Estado, actuando por conducto de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), controla toda la cadena de actividades concernientes a la energía eléctrica, desde su generación, hasta su comercialización, pasando por la distribución y transmisión. La Reforma prevé que el sector privado participe abiertamente en dos eslabones de la cadena productiva, la generación y la comercialización de energía eléctrica. Con ello se busca incentivar el mercado de generación eléctrica con el desarrollo de más y mejores proyectos.
- **La tecnología.** La tecnología para el aprovechamiento de energía geotérmica de mediana y baja entalpía para generación de electricidad ha evolucionado considerable y favorablemente: hoy día existen equipos y sistemas muy confiables, cuya inversión se puede amortizar en plazos aceptables en función de los costos que evita, aunque esto depende de otras variables, como son, las tarifas aplicables a la energía que llega de la red eléctrica, las tasas de interés y los costos de desarrollo de los proyectos.
- **Las tarifas eléctricas.** En todo el mundo la rentabilidad de los proyectos depende de los costos que se evitan, las tarifas eléctricas son un factor clave, sobre todo si su precio es alto y tienden a seguir subiendo. Así, los proyectos que aprovechan recursos de energía renovable y que se desarrollan para entregar energía a los municipios, se justifican por las tarifas que se aplican a los servicios municipales, como también aquellos cuyos usuarios finales son empresas comerciales e industriales, sobre todo por los precios de la energía eléctrica en período de punta.
- **Las regulaciones.** Otro elemento importante para el desarrollo de los proyectos con este tipo de energía, son las regulaciones. En México particularmente las emitidas por la Comisión Reguladora de Energía. Resalta una en particular el “Contrato de interconexión para fuentes de energía renovable del tipo intermitente”, que es el mecanismo donde se establecen términos y condiciones para la interconexión necesaria entre el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), la planta de aprovechamiento de energía renovable y los centros de consumo del permisionario, de manera que dicho contrato sirva de marco para todas las operaciones entre el suministrador y el permisionario. Estas regulaciones han permitido reconocer, dentro del marco legal actual, el valor que tiene para la red eléctrica la aportación de la energía renovable en términos de energía y potencia, lo que permite dar viabilidad económica a algunos proyectos.
- **El mecanismo de desarrollo limpio.** El Mecanismo de Desarrollo Limpio es un procedimiento que permite a países desarrollados financiar proyectos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) dentro del territorio de naciones en desarrollo, y recibir a cambio recursos en forma de Certificados de Reducción de Emisiones (CRE) [7]. La existencia de este mecanismo y el hecho de que los proyectos que aprovechan energía geotérmica de mediana y baja entalpía tienen muy bajas o nulas emisiones de gases de efecto invernadero, han generado el interés por implementarlos, en virtud de que los pagos que se obtienen mediante los CRE mejoran su rentabilidad.

1.2.1 La necesidad

La energía eléctrica y la elaboración de productos son un elemento fundamental en la vida diaria de cualquier comunidad. En el ámbito municipal, la energía eléctrica permite iluminar las calles por las noches, hacer llegar agua potable a los hogares, desalojar las aguas negras, además de que los ayuntamientos puedan operar los inmuebles en los que se ubica su administración.

Igualmente, hoy en día los municipios comparten la responsabilidad de la electrificación rural de comunidades alejadas de la red eléctrica, por lo que el aprovechamiento de la energía renovable puede ser la alternativa de inversión más económica. Los servicios municipales como alumbrado público, bombeo de agua y edificios públicos se han convertido en un gasto muy importante para los ayuntamientos, debido al régimen tarifario al que están sujetos. La posibilidad de tener un suministro alternativo al aprovechar la energía geotérmica de mediana y baja entalpía para generación de energía eléctrica se convierte ahora en un aspecto de interés para los ayuntamientos.

Para zonas rurales o de gran extensión, la existencia de comunidades aisladas sin electricidad es un asunto problemático que puede resolverse, a un costo menor que la extensión de la red eléctrica, con el uso de la tecnología que aprovecha la energía geotérmica de mediana y baja entalpía.

1.3 Usos de la energía geotérmica

Desde un punto de vista práctico, los recursos geotérmicos pueden definirse como depósitos de energía térmica que pueden ser explotados a un costo competitivo razonable con otras formas de energía dentro de un periodo de tiempo especificado. Los recursos geotérmicos han sido considerados de acuerdo con la temperatura del depósito en campos de baja, media y alta entalpía. Además, las temperaturas que se encuentran a muy poca profundidad se pueden utilizar para extraer y almacenar calor para la calefacción y la refrigeración por medio de bombas de calor.

En 1973, Lindal indicó el rango de temperatura del agua y el vapor geotérmico conveniente para varias aplicaciones (Figura 7) [8]. Convencionalmente, los recursos geotérmicos son recursos hidrotermales que incluyen depósitos de agua caliente y/o vapor de agua, y se clasifican como recursos dominados por vapor o líquido dominante.

La temperatura de recursos de baja entalpía se encuentra por debajo de 100 °C, mientras que los recursos de media y alta entalpía se encuentran en el intervalo de temperatura de 100 -180 °C y por encima de 180 °C, respectivamente. Baja entalpía, los recursos hidrotermales se utilizan principalmente para uso del calor directo, mientras que los recursos de media y alta entalpía se utilizan para generar energía eléctrica y en algunos casos también calor en plantas de cogeneración.

Existen recursos hidrotermales superficiales a profundidades moderadas y son las fuentes menos abundantes de recursos geotérmicos. Otros recursos geotérmicos incluyen fluidos geo-presurizados, magma y roca caliente seca. Además, la utilización de recursos no convencionales supercríticos (temperatura > 374 °C y presión > 222 bar refiriéndose al agua pura) se está investigando a través del Proyecto de Perforación Profunda islandés. El proceso implica la transferencia de fluidos supercríticos a la superficie y la conversión de todo el flujo másico (en comparación con el 20-30% para plantas flash) en vapor sobrecalentado aumentando así la eficiencia global del proceso [9].

1.3.1 Generación de energía eléctrica

Para la generación de electricidad se requiere una adecuada temperatura, por lo que es necesario estudiar las posibilidades que ofrece la producción de vapor y la presión que se puede obtener para este fin. Dependiendo de las características del fluido geotérmico se utilizan diferentes ciclos de producción de potencia.

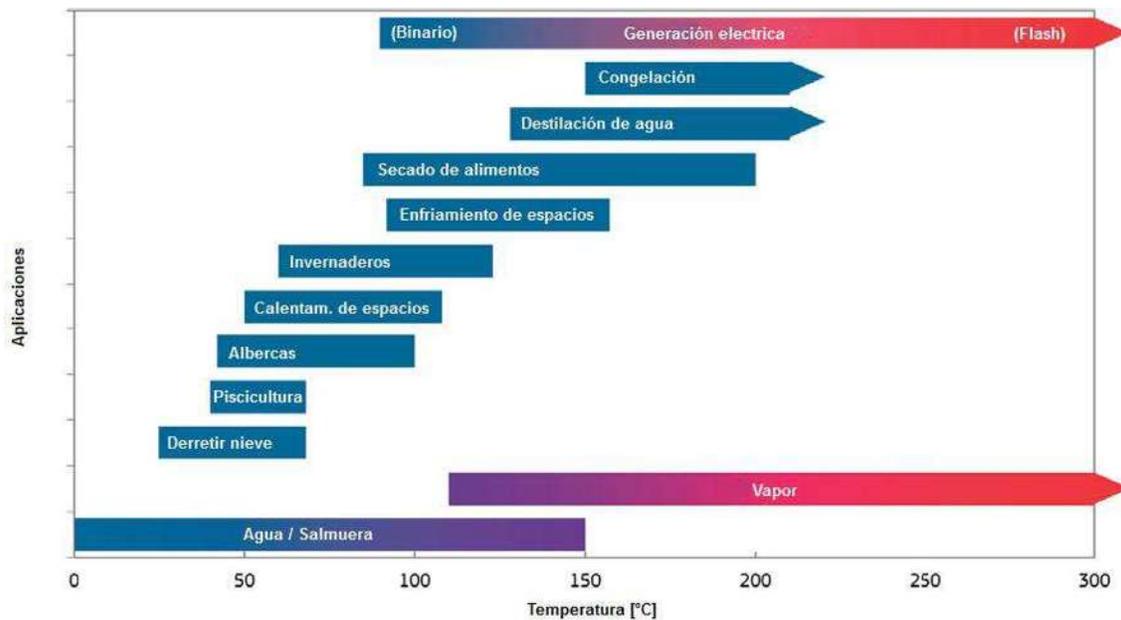


Figura 7. Diagrama de Lindal de temperatura adecuada de vapor y agua geotérmica para varias aplicaciones.

Ciclos de vapor seco. Vapor seco son el tipo de plantas más antiguo de energía geotérmica, la primera se utilizó en 1904. Las plantas de vapor seco llegan a ser casi un cuarto de la capacidad de la energía geotérmica actualmente. La tecnología de vapor seco se utiliza en conjunto con los recursos dominados por vapor. Una visión general se proporciona en la Figura 8. El vapor de los pozos de producción (PP) con varias válvulas de boca de pozo (VP) se transfiere a través de un removedor de partículas (RP) hacia removedores de humedad (RH). Allí, las válvulas de control y cierre (VCC) ajustan el flujo de vapor en la turbina, donde se expande para generar trabajo mecánico, acoplada al generador eléctrico (T/G). Posteriormente el vapor se condensa en un condensador (C) y luego se bombea (BC) hacia una torre de enfriamiento (TE). El agua fría se recircula por bombas de agua de enfriamiento (BAE) hacia el condensador de nuevo o se re-inyecta al depósito a través de pozos de reinyección (PI). Agua de reposición (por lo general menor que para plantas de combustibles fósiles, el condensado se utiliza para la refrigeración) y la cantidad depende del clima y la configuración de la planta de energía. La cantidad de gases incondensables (típicamente entre 0,5 y 10% en peso del vapor, a veces superior) requiere un sistema de extracción de gases. Los gases incondensables son dispersados en la parte superior de las torres de enfriamiento. El agua de enfriamiento puede ser corrosiva para el sistema, por lo tanto el pH del agua de enfriamiento es supervisado y se puede ajustar por ejemplo con sosa cáustica. Las centrales de vapor seco tienen la más alta eficiencia entre todas las plantas de energía geotérmica. Son comercialmente probadas, fáciles de manejar y requieren relativamente bajo costo capital. Sin embargo, sólo son adecuados para recursos de vapor seco, de los cuales hay poco potencial conocido sin explotar. Las plantas de vapor seco no son adecuados para aplicaciones combinadas de calor y potencia (CHP) [10].

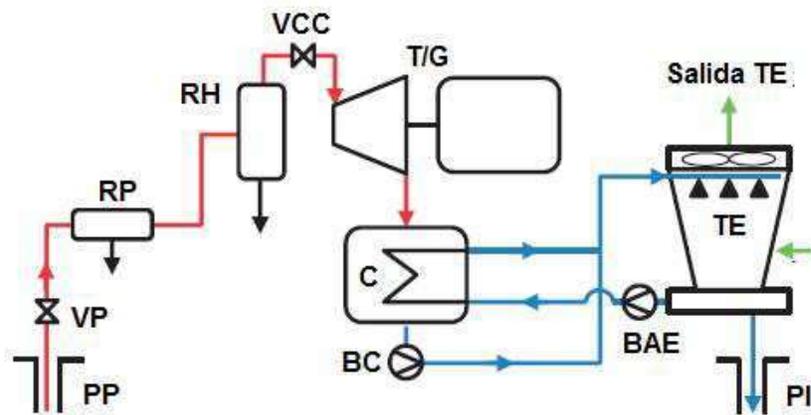


Figura 8. Esquema de un ciclo directo sin condensación.

Plantas simple-flash. Las plantas de vapor flash son el tipo de plantas de energía geotérmica más común, lo que representa alrededor de dos tercios de la capacidad instalada de la energía geotérmica. La tecnología de vapor flash hace uso del recurso hidrotermal líquido dominante con una temperatura por encima de 180 °C. En los depósitos de alta temperatura, el componente de agua líquido hierve, o 'flashea' conforme la presión cae (Figura 9). El fluido de los pozos de producción (PP) fluye a través de separadores ciclónicos (SC). La trayectoria de flujo para el vapor de agua después de los separadores ciclónicos suele ser el mismo para las plantas flash como para plantas de potencia con vapor seco después de los removedores de partículas. El vapor se puede condensar en cualquier tipo de condensador, de contacto directo o superficie. Cuando los condensadores de contacto directo se utilizan una fracción mayor de los gases incondensables (principalmente los solubles en agua gases como CO₂ y H₂S) se quedan capturados en el condensado. El diseño del condensador puede tener un impacto perjudicial con el tratamiento de los gases. En una planta de simple flash el agua separada de los separadores ciclónicos se bombea hacia los pozos de inyección [10].

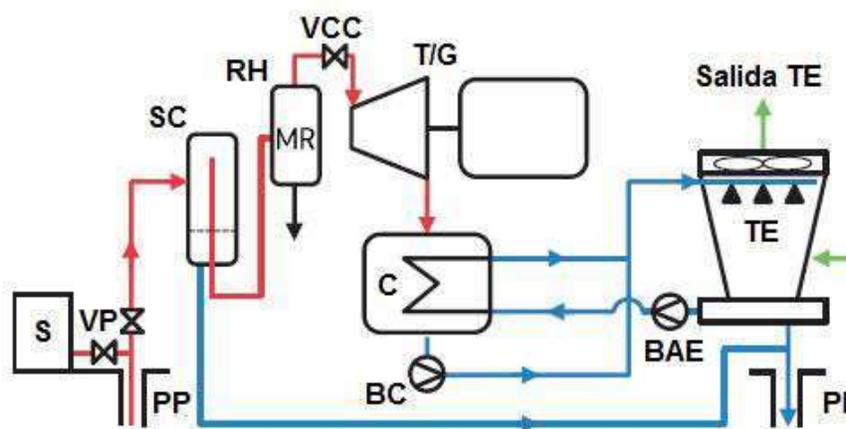


Figura 9. Esquema de una planta simple-flash.

Plantas doble-flash. Cuando las condiciones de temperatura y presión son adecuadas el agua separada del primer flasheo también puede ser flasheada en un tanque flash (F), donde se genera vapor adicional a presión más baja que el primer flasheo. Este vapor se desvía hacia la turbina a una etapa de baja presión. Durante la segunda y tercera etapa de flasheo aumenta el riesgo de incrustación cuando la temperatura del fluido se reduce y la concentración de solutos se incrementa. El riesgo de incrustación puede disminuirse por dilución de las aguas separadas con condensados antes de la reinyección. Plantas de ciclo combinado de vapor flash utilizan el calor de la salmuera geotérmica separado en plantas binarias para producir energía adicional antes de la re-inyección. La energía térmica de la salmuera también se puede extraer a través de intercambiadores de calor antes de la reinyección.

Las centrales de simple flash y doble flash alcanzan eficiencias entre el 30-35% y 35-45%, respectivamente, cuando la electricidad es el único producto. La eficiencia global se incrementa en gran medida mediante la adición de intercambiadores de calor y la producción de agua caliente ya que el factor de conversión en un intercambiador de calor es mucho mayor que la conversión de calor a electricidad. Las plantas de energía flash tienen una simple configuración y ya se ha comprobado tecnológicamente; varios proveedores de sistemas disponibles en el mercado están presentes en el mercado. Las plantas de energía flash requieren poco capital, pero son económicamente competitivas sólo cuando los recursos geotérmicos están a 200-240 °C o más temperatura. Las plantas de energía de doble flash tienen un aumento de la potencia y la eficiencia (5-10%) en comparación con los de una solo flash pero requieren mayores costos de capital y recursos más altos de temperatura (> 240 °C) con la finalidad de ser competitivas. En ambas tecnologías, los costos de operación y mantenimiento (O & M) aumentan significativamente cuando los recursos se tratan de salmueras con alto contenido de minerales. Las plantas de energía flash vienen en diferentes tamaños con unidades individuales de turbina que van desde 1 MW a 100 MW [10].

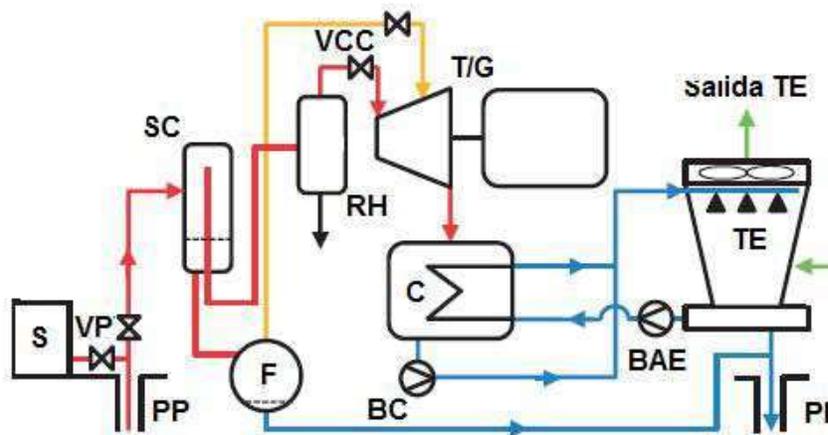


Figura 10. Esquema de una planta doble-flash.

Ciclos binarios. Unidades de generación eléctrica con ciclos binarios constituyen el grupo de crecimiento más rápido de las plantas de energía geotérmica, ya que son capaces de utilizar recursos de baja a mediana temperatura, que son los que más prevalecen. Hoy en día, las plantas binarias tienen una participación del 11% de la capacidad instalada de generación en todo el mundo y una participación de 45% en cuanto a número de plantas [11]. Plantas binarias de energía, que emplean Ciclo Rankine Orgánico (ORC) o un ciclo de Kalina, operan con agua con temperaturas de

aproximadamente 74 a 180 °C utilizando el calor del agua caliente para calentar un fluido de trabajo, por lo general un compuesto orgánico con un punto de ebullición bajo.

Ciclo ORC. En las plantas ORC, fluido geotérmico generalmente se bombea (B) de los pozos de producción (PP). Un removedor de arena (RA) elimina los sólidos en suspensión antes de que el fluido entra en un evaporador (E), y pasa a un precalentador (PC) antes de que sea bombeada de nuevo en los pozos de inyección (PI). En el evaporador un fluido de trabajo precalentado en un precalentador se evapora antes de entrar en una unidad de turbogenerador (T/G). El fluido de trabajo se condensa en un condensador (C) y se bombea de nuevo al precalentador en un circuito cerrado. El agua de enfriamiento se bombea desde una torre de enfriamiento (TE) hacia el condensador y el agua de reposición (M) es bombeada hacia la torre de enfriamiento para compensar las pérdidas por evaporación [10].

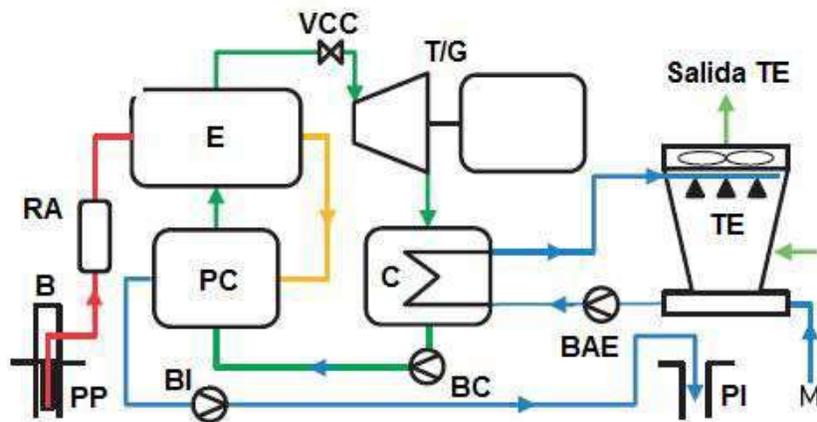


Figura 11. Esquema de un ciclo Rankine orgánico.

Ciclo Kalina. Las plantas de ciclo Kalina operan con una mezcla de amoníaco y agua y la composición química del fluido de trabajo se ajusta a la temperatura del fluido geotérmico. La forma más simple de una planta de ciclo Kalina se muestra en la Figura 12. El fluido geotérmico se bombea (B) de los pozos de producción (PP) a un evaporador (E) antes de ser enviado de nuevo a los pozos de inyección (PI) o que pueda ser utilizado para la calefacción urbana. El fluido de trabajo se evapora en un separador (S) a partir de vapor saturado, donde el flujo rico en amoníaco va a la turbina (T), permitiendo así una turbina más pequeña menos costosa para instalarse. El resto, la solución rica en agua fluye a través de un precalentador (PC) y luego es estrangulado corriente debajo de la turbina (TV) y se mezcla con la solución rica en amoníaco. La mezcla entra en un precalentador de recuperación (PCR) antes de ser condensada (C). Después de la condensación el fluido de trabajo se calienta primero en el precalentador de recuperación y a continuación, en el precalentador antes de entrar en el evaporador. El agua de enfriamiento se bombea desde una torre de enfriamiento (TE) hacia el condensador y el agua de reposición (M) se bombea hacia la torre de enfriamiento para compensar las pérdidas por evaporación. Como con la mayoría de las configuraciones de plantas de energía geotérmica, la torre de enfriamiento puede omitirse mediante el bombeo de agua fría directamente en el condensador y usando el agua caliente como resultado de calefacción urbana. Esta opción requiere un uso más directo de agua, pero puede ser opción factible donde el agua no es un recurso limitado.

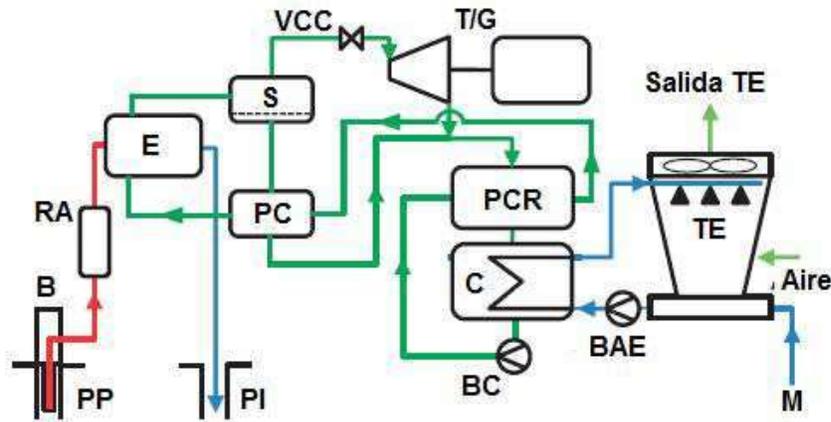


Figura 12. Esquema de un ciclo Kalina.

En las plantas binarias, el agua geotérmica y el fluido de trabajo se mantienen separados durante la totalidad del proceso, por lo que hay poco o nada de emisiones al aire. Los sistemas binarios se pueden producir en tamaños muy pequeños (0.1 - 5 MW), así como unidades modulares [8]. El ORC puede alcanzar eficiencias hasta 25%. Los altos costos de O & M están presentes cuando el recurso tiene una alta salinidad, que entra en contacto directo con la planta. Los proveedores de tecnología son escasos, y sólo algunos están disponibles comercialmente. El ciclo de Kalina puede, bajo ciertas condiciones de diseño, operar a mayores eficiencias que el ORC. Pero debe centrarse en la reducción de los costos para hacer competitiva la tecnología con las alternativas actuales ORC. En la actualidad, las centrales de ciclo Kalina se asocian con altos costos de capital y complejidad tecnológica. La tecnología es todavía no financiable y pocas plantas actualmente están en funcionamiento.

1.3.2 Usos directos del calor geotérmico

Bajo la denominación de uso directo, o inmediato, de la energía geotérmica se engloban diferentes aplicaciones, formas por las cuales se utiliza el calor geotérmico para obtener un producto o servicio en particular. Entre las aplicaciones más comunes en este sentido se encuentran la calefacción de distrito, refrigeración o aire acondicionado, agua caliente sanitaria, deshidratado y conservación de productos agrícolas, básicamente es emplear dicha energía para usos no eléctricos. Las aplicaciones, que abarcan la calefacción del agua de piscinas y recintos para baños, la climatización y producción de ACS en edificios y viviendas, calefacción de invernaderos y secado de cosechas, acuicultura o piscifactorías, la fabricación de productos industriales, la recuperación de metales, e incluso, aunque sólo sea a nivel estadístico, las instalaciones de bombas de calor geotérmicas que explotan energía de muy baja o de baja temperatura.

Se han implementado usos directos convencionales de fluido geotérmico durante largos períodos de tiempo en que comunidades utilizan aguas termales para bañarse y otras actividades locales. Hoy en día, los sistemas modernos de uso directo, el agua caliente se produce a partir de un pozo geotérmico perforado que implica el diseño preliminar y conceptual de un proyecto de uso directo, junto con las pruebas de incrustación y evaluación. En la mayoría de los sistemas de aplicaciones geotérmicas directas utilizan intercambiadores de calor para mantener el fluido geotérmico separado del fluido de trabajo que transmite el calor de los fluidos geotérmicos a la aplicación. El desarrollo de sistemas de uso directo, especialmente cuando no se utilizan intercambiadores de calor, requiere la ingeniería cuidadosa, selección de materiales y opciones de diseño que permitan que el sistema sea rentable.

El uso de recursos geotérmicos de alta entalpía para la generación de energía eléctrica sigue siendo el más popular a pesar de la situación económica, así como los beneficios ambientales de la utilización de fluidos de mediana-a-baja entalpía para uso directo siguen siendo prometedoras. De hecho, la energía de mediana a baja entalpía se aplica ampliamente en regiones no tropicales, donde la demanda de calefacción de espacios es muy alta, por no mencionar el uso del fluido geotérmico para fines industriales tales como procesos agrícolas y secado. Sin embargo, un problema en el proceso de desarrollo de los usos directos es la cuestión relacionada con el costo debido al hecho de que las aguas geotérmicas sólo pueden ser transportadas en un rango y distancia limitada debido a la pérdida de calor a lo largo de la línea de transmisión.

Tabla 4. Usos directos en función de la temperatura del fluido geotérmico.

Temperatura °C	USOS
180	Evaporación de soluciones altamente concentradas.
	Refrigeración por absorción de amoniaco, digestión de pasta papelera (kraft).
	Agua pesada mediante un proceso con sulfuro de hidrogeno.
160	Secado de alimento para pescado, secado de madera.
	Alumina mediante el proceso Bayer
140	Secado de productos agrícolas a altas velocidades, enlatados de alimentos.
120	Extracción de sales por evaporación, evaporación en la refinación de azúcar.
	Agua dulce por destilación.
	Concentración de solución salina mediante evaporación de efecto múltiple
	Secado y curado de planchas de hormigón ligero.
100	Secado de materiales orgánicos, algas, hierba, hortalizas, etc.
	Lavado y secado de lana.
80	Secado de pescado, operaciones intensivas de descongelamiento.
	Calefacción ambiental.
	Refrigeración (limite de temperatura inferior).
60	Zootecnia.
	Invernaderos mediante una combinación de calefacción ambiental y de foco.
	Cultivo de setas.
40	Calentamiento del suelo, balneología.
	Piscinas, biodegradación, fermentaciones.
	Agua caliente para la industria minera todo el año en climas fríos.
	Descongelamiento.
20	Criaderos de peces. Piscicultura

1.3.2.1 Natación, baños y balneología. La energía geotérmica utilizada en forma de calor, a nivel mundial, para natación, baños y balneología representan el 19.1 % de los usos directos. Se refiere exclusivamente a lo que en casi todo el mundo se conoce como “spas” y “resorts”, que emplean agua geotérmica captada en el subsuelo que intercambia calor con el agua del circuito secundario, que, a su vez, se emplea para llenar piscinas y proporcionar calefacción y ACS a los recintos de baños, pero es difícil de contrastar, y puede que las estadísticas incluyan aguas termales y medicinales de los balnearios de salud tradicionales, que fluyen libremente en superficie. En la Figura 13, se muestra una piscina de agua caliente [12].



Figura 13. Spa situado en Erding Alemania.

Calefacción de edificios y producción de ACS. En la Figura 14 [12], se muestra una aplicación típica de circuito cerrado para abastecimiento de calefacción y aporte de Agua Caliente Sanitaria (ACS). En ella, el agua del circuito secundario se hace circular por tuberías que, con una distribución adecuada, recorrerá una serie de edificios, complejos, centros de gran extensión, o incluso grupos de viviendas particulares, proporcionando tanto calefacción como agua caliente sanitaria. Las necesidades de calefacción prevén temperaturas de uso entre 50 - 60 °C y las de ACS entre 40 - 50 °C, con lo cual, y con unos intercambiadores de placas modernos de hasta un 70 % de eficacia, se precisarían unas aguas geotérmicas entre 80 y 90 °C.

Calefacción de invernaderos. Durante los últimos 25 años, el calentamiento de invernaderos ha sido el uso más común de la energía geotérmica en la agricultura. En muchos países, se utiliza el calor geotérmico para producir hortalizas, frutas y flores en una escala comercial durante todo el año. El uso de la energía geotérmica para calentar invernaderos tiene varios beneficios [13]:

- La energía geotérmica a menudo cuesta menos que energía de otras fuentes disponibles.
- Los sistemas de calefacción geotérmica son relativamente fáciles de instalar y mantener.
- Invernaderos representan una gran proporción del consumo total de la energía de baja entalpía en la agricultura.
- Las zonas de producción con invernaderos están a menudo cerca de lugares con recurso geotérmico de baja entalpía.
- Se mejora la eficiencia de la producción de alimentos, haciendo uso localmente de fuentes de energía disponibles. En el cultivo de plantas en invernaderos, lo que se pretende es reproducir

las condiciones de humedad y temperatura ideales en ambientes que no las poseen de forma natural.

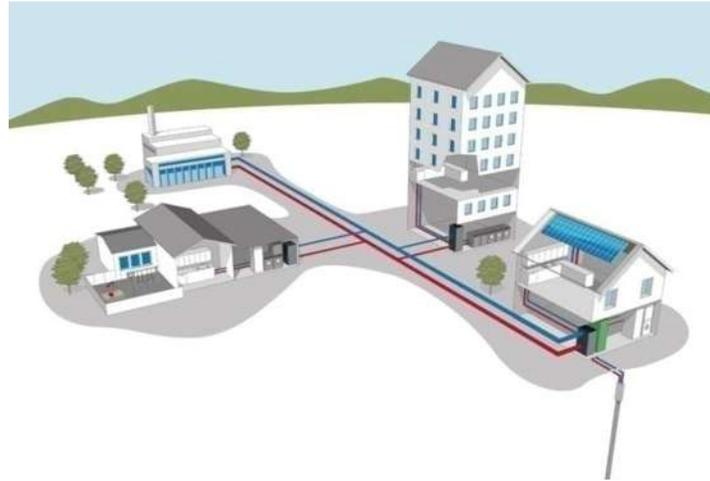


Figura 14. Suministro de ACS a edificios mediante energía geotérmica.

Como se puede apreciar en la Figura 15, cada tipo de cultivo requiere una forma óptima de empleo del calor, bien por convección forzada como en las figuras f) o g), o por radiación desde focos de diversa posición. Plantas herbáceas o leguminosas requieren focos apartados e indirectos, mientras los frutos carnosos precisan una radiación más directa, como en la figura a). En la Figura 15 [12], en el esquema d), se puede apreciar cómo el agua de climatización del invernadero puede ser incluso empleada para, circulando en su retorno al intercambiador por tubos enterrados junto a las raíces de las plantas, proporcionar un calor adicional por conducción al sustrato mineral, incrementando el rendimiento de las cosechas en las especies que así lo aconsejen.

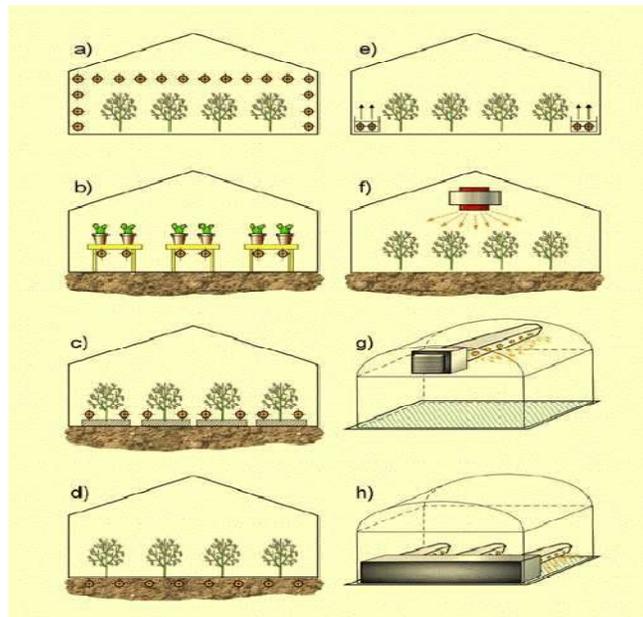


Figura 15. Diversas formas de empleo de calor en invernaderos.

Acuicultura y crianza de animales. Una interesante aplicación del calor geotérmico es la de climatizar las aguas de piscifactorías, tanto de carácter fluvial o lacustre como marina, para algunas especies concretas. Especies como carpas, barbos, róbalo, salmonetes, angulas, salmones, esturiones, camarones, langostas, cangrejos, ostras, mejillones o almejas, son algunas de las principales especies que responden perfectamente a una crianza en ambientes de temperatura constante. En el crecimiento de especies animales con temperatura, la crianza de especies acuáticas es mucho más delicada que la de animales terrestres de granja, y también mucho más sensible a variaciones de temperatura. Una pequeña variación de temperatura entre los diversos tanques de crianza de alevines y las subsecuentes de crecimiento en etapas, mejora la propagación de la especie y los aumentos de tamaño de las piezas. El mantenimiento de la temperatura a lo largo de las estaciones, implica mejoras de rendimiento en peso de hasta el 35% en peces y crustáceos. En la Figura 16, puede apreciarse el momento de trasvase de alevines de un tamaño dado al siguiente tanque de crecimiento [12].

Secado de alimentos y maderas. Se ha extendido la práctica de utilizar el calor geotérmico para el secado de productos agrícolas, carnes y pescados, así como para el secado selectivo de maderas. El secado suele hacerse por convección con aire caliente, cuyo intercambio con el circuito de aguas geotérmicas se realiza en un intercambiador de placas, donde el aire circula directamente entre los conductos del agua caliente, accediendo luego a las cámaras de secado de alimentos. Cada uno de estos alimentos, dependiendo de su contenido en agua, precisa una temperatura de secado, con lo que la variación de la temperatura del recurso deberá adaptarse a cada necesidad, pero se mantiene en un rango de entre 60 °C - 120 °C [12].



Figura 16. Criadero piscícola climatizado con energía geotérmica.

Otras aplicaciones. Dependiendo de su temperatura, las aguas geotérmicas son también adecuadas para procesos como el manipulado de la pasta de celulosa en la industria del papel, o los aportes de calor necesarios en la industria del secado y envasado de ciertos alimentos, o bien, a temperaturas más elevadas, en el propio proceso de los alimentos en la industria de conserveras, agua caliente para máquinas de lavado, estaciones de lavado de vehículos, refrigeración por absorción a diversas temperaturas y un etcétera de aplicaciones que constituyen una muestra de las bondades de un sistema de calor geotérmico barato y de gran disponibilidad [12]. En la Figura 17, se puede apreciar un complejo industrial que utiliza calor geotérmico, para fabricación de pasta de papel, secado de madera y producción de energía eléctrica [12].



Figura 17. Complejo industrial de Kawerau, Bahía de Plenty. Nueva Zelanda.

Una aplicación bastante reciente de los yacimientos geotérmicos y, por ello, no muy extendida, es la obtención de productos en la industria química. Es bastante frecuente encontrar en disolución gases como metano o hidrógeno, con buenas posibilidades de separación, así como compuestos corrosivos, cuyo beneficio industrial al ser recuperados no es demasiado alto; pero, si se añade el beneficio de un menor costo de instalaciones de bombeo y conducción, el separarlo puede incorporar al proceso unos interesantes puntos de rentabilidad añadida [12]. Otras aplicaciones se enmarcan en el sector de la minería, para explotación de minerales industriales y recuperación de metales.

1.4 Recurso geotérmico en México

Desde la década de los setenta se han efectuado diversas estimaciones sobre el potencial geotérmico de México. La primera estimación de los recursos geotérmicos de la república Mexicana reportada en la literatura fue hecha por Alonso [14], en este estudio se estimó una capacidad mínima de 100 MWe para los recursos de alta temperatura en las zonas ubicadas en la Faja Volcánica Mexicana (entre las cuales están Ixtlán de los Hervores, Los Negritos, Los Azufres, La Primavera, San Marcos, Hervores de la Vega, La Soledad y Los Humeros). De igual manera se estimó un potencial mínimo del campo geotérmico de Cerro Prieto y sus alrededores de 500 MWe, en el cual ya operaban para esa fecha las dos primeras unidades geotermoeléctricas de 37.5 MW.

Posteriormente, Mercado [15] calculó un potencial de 13,110 MWe por medio de métodos geoquímicos, mediante un proceso simplificado que incluía una estimación del volumen de roca porosa y permeable en cada zona geotérmica, la estimación del calor recuperable en superficie en ese volumen y la aplicación de un factor de conversión entre la energía térmica y la energía eléctrica que podría generarse con ella.

En 1985 Alonso [16] utilizando los conocimientos y la tecnología actual publicó una nueva estimación basada en reservas probadas, probables y posibles, obteniendo para las primeras 1340 MWe, 4600 MWe reservas probables y 6000 MWe para las reservas posibles. Al mismo tiempo, Mercado *et al.* [17] presentaron una evaluación del potencial geotérmico del país para recursos de temperatura intermedia

(125 a 135°C), dividieron el país en dos regiones. En la primera, la región centro y sur del país, consideraron una franja de 900 km de largo y 4 km de ancho en el Cinturón Volcánico Mexicano, calculando un potencial de 31,498 MWe. La segunda región comprendió el norte del país con un área de 2000 km² obteniendo un potencial de 14,317 MWe. El potencial total para el país resultó en 45,815 MWe.

Iglesias et al. [18], por su parte, han realizado diversos cálculos para evaluar el potencial geotérmico de México de una manera más precisa, utilizando el método volumétrico y estimando la energía geotérmica de 297 localidades, lo cual represento una primera aproximación de las reservas de México. Iglesias y Torres [19] estimaron las reservas geotérmicas para 276 localidades de la república estimando que estas van de 3.08×10^{17} hasta 3.45×10^{17} kJ, esto con un intervalo de confianza del 90%. Estimaron que el total de reserva correspondiente a las 276 localidades se encuentra entre 2.14×10^{10} y 2.39×10^{10} MW_{Th}.

Uno de los últimos trabajos fue el de García [20], en el cual elaboró un mapa Nacional de los Recursos Geotérmicos de México en el que mediante una técnica de contornos de color se despliega el valor índice geotérmico, el cual presenta localidades para ser exploradas mediante estudios de mayor detalle. El autor menciona que las zonas de mayor atractivo se producen en torno a Cerritos Colorados, Los Azufres, Cuitzeo, zonas volcánicas en Nayarit, Ixtlán de los Hervores y Los Negritos.

En 2009 Iglesias y Torres [21] obtuvieron una distribución de temperaturas de fondo más probables para las 276 localidades, cuya media resultó ser de 111°C. Como resultado de la estimación se obtuvo un volumen total de calor almacenado hasta una profundidad máxima de 3 km, de entre 308 y 345 EJ (exajoules) térmicos, con un intervalo de confianza de 90%. Aplicando un factor de recuperación del 25%, se estimó el potencial térmico total entre 77 y 86 EJ térmicos, que equivalen a 21.4-23.9x10⁹ MW térmicos. Se trata de la energía térmica total almacenada en el subsuelo, y no de un potencial geotérmico en términos de capacidad instalada aprovechable en usos directos.

1.4.1 Potencial geotérmico de mediana y baja entalpía en México.

Los recursos geotérmicos consisten principalmente de energía térmica. Por ello, la caracterización de recursos geotérmicos es la estimación de la energía térmica en el subsuelo, referida a la temperatura anual media, y acoplada con una estimación de la fracción de dicha energía que podría ser extraída económica y legalmente en un futuro razonable. Una caracterización de recursos es una declaración hecha en un momento determinado, usando un conjunto de datos y de hipótesis acerca de variables económicas, tecnológicas, etc.

La primera estimación de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja ($T \leq 200^\circ\text{C}$) la realizó Iglesias y Torres, en 2003 [22], esta fue hecha con base en datos de 1358 manifestaciones superficiales identificadas en ese momento, este estudio partió de datos publicados por Torres, et al. [23], en los que se identificaban 1,538 manifestaciones superficiales (manantiales, fumarolas, pozos de agua, etc.). Debido a falta de información en uno o más parámetros relevantes, como coordenadas geográficas, temperatura de muestra o del yacimiento, etc., dicha evaluación incluyó aproximadamente 30% de las manifestaciones identificadas. Después del filtrado de la información concluyeron en 276 localidades geotérmicas distribuidas en 20 estados Mexicanos. Posteriormente, Iglesias y Torres, en el 2004 [21], estimaron las energías térmicas totales, y sus reservas geotérmicas, de cada uno de los veinte Estados Mexicanos considerados por Iglesias et al. [22].

García en el 2006 [20], elaboró un mapa Nacional de los Recursos Geotérmicos de México (Figura 18) en el que mediante una técnica de contornos de color se despliega el valor índice geotérmico, el cual presenta localidades para ser exploradas mediante estudios de mayor detalle. El autor menciona que las zonas de mayor atractivo se producen en torno a Cerritos Colorados, Los Azufres, Cuitzeo, zonas volcánicas en Nayarit, Ixtlan de los Hervores y Los Negritos.

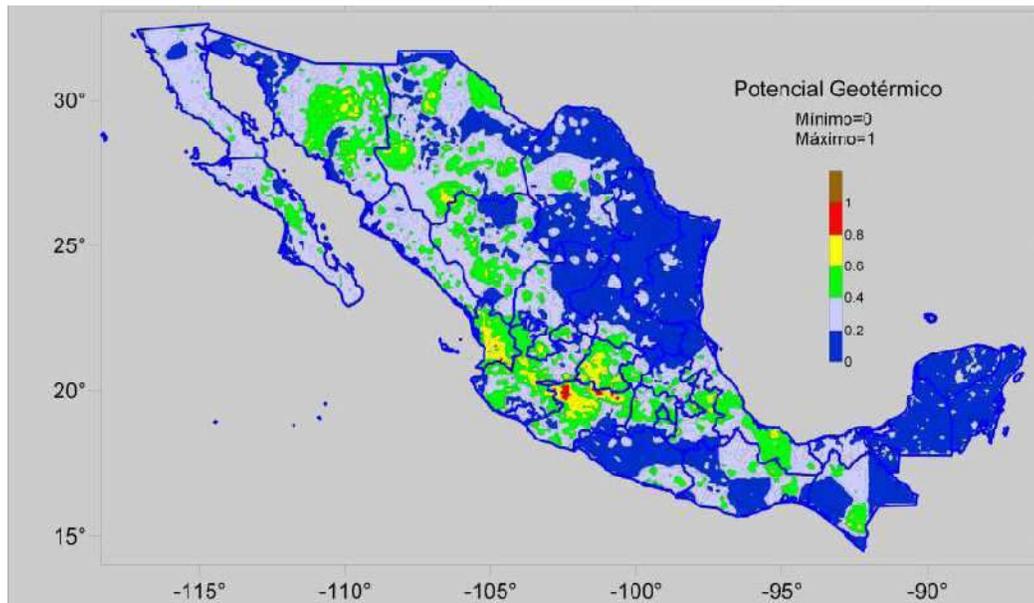


Figura 18. Mapa nacional de recursos geotérmicos.

En 2009 Iglesias y Torres [21] hacen una primera estimación, parcial, de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja de México. La estimación incluye 29.16% de las manifestaciones geotérmicas identificadas en la base de datos pública utilizada. Para estimar las reservas se utilizaron el método de volumen, suplementado con simulaciones por el método de Montecarlo, con el fin de cuantificar las incertidumbres inherentes. Las estimaciones se presentan estado por estado. Estos resultados indican que las reservas agregadas de los 20 estados considerados están entre 7.7×10^{16} y 8.6×10^{16} kJ, con 90% de confianza. La distribución de las temperaturas de yacimiento más probables varía entre aproximadamente 60 y 180 °C, con un valor medio de 111 °C. En la Tabla 5 se presentan un resumen de las estimaciones de reservas por Estado. Para la elaboración de la Tabla 5, se consideraron 59 reservas estimadas para cada estado y los correspondientes intervalos de confianza del 90% [21]. En la Figura 19 se muestran 276 localidades geotérmicas distribuidas en 20 estados de la Republica Mexicana [21].

Flores y Gutierrez, en el 2011 [24] presentaron un mapa de los principales sitios geotérmicos en exploración (Figura 20), donde resaltan los sitios como:

- **Piedras de Lumbre (Chihuahua)**, en este sitio se comenta que existió una central de ciclo binario de 300 kW que era alimentada por un reservorio poco profundo de baja entalpía, esta planta alimentaba a una pequeña villa que se encontraba aislada de la red eléctrica de CFE, la

Tabla 5. Reservas por estado y temperaturas promedio estimadas [21].

Estado	Número de manifestaciones geotérmicas			Número de localidades incluidas en el estudio	Reservas (kJ)			Promedio de las temperaturas medias de las localidades (°C)	
	En el estado	Incluidas en el estudio			Min. intervalo de confianza de 90%	Máximo intervalo de confianza de 90%	Media de la distribución	Media	Desviación estándar
		Número	%						
Aguascalientes	49	18	36.7	7	2.36E+15	5.58E+15	3.80E+15	119.41	22.25
Chiapas	14	3	21.4	3	4.57E+14	1.04E+15	7.30E+14	139.01	26.49
Chihuahua	53	13	24.5	11	2.17E+15	3.34E+15	2.73E+15	104.72	22.00
Colima	3	1	33.3	1	6.03E+13	3.63E+14	1.93E+14	114.79	76.65
Durango	55	5	9.1	5	6.48E+14	1.40E+15	9.95E+14	85.20	12.94
Edo. de México	6	5	83.3	3	5.30E+14	1.23E+15	8.65E+14	129.81	8.52
Guanajuato	172	75	43.6	47	1.08E+16	1.35E+16	1.21E+16	114.92	17.64
Guerrero	10	1	10	1	6.00E+13	3.80E+14	1.92E+14	78.05	92.38
Hidalgo	76	43	56.6	28	8.69E+15	1.19E+16	1.03E+16	112.50	16.75
Jalisco	391	66	16.9	41	1.24E+16	1.71E+16	1.46E+16	113.44	21.83
Michoacán	71	27	38	24	5.72E+15	8.45E+15	6.98E+15	119.15	25.29
Morelos	2	1	50	1	6.50E+13	3.20E+14	1.74E+14	95.80	64.37
Nayarit	56	19	33.9	13	3.70E+15	5.92E+15	4.75E+15	110.57	17.22
Oaxaca	12	5	41.7	4	5.67E+14	1.21E+15	8.63E+14	112.93	13.18
Puebla	17	7	41.2	6	9.20E+14	1.67E+15	1.28E+15	106.68	15.97
Querétaro	172	63	36.6	54	1.23E+16	1.55E+16	1.38E+16	107.22	12.64
San Luis Potosí	20	7	35	6	1.25E+15	2.55E+15	1.86E+15	108.72	46.64
Sonora	77	9	11.7	8	1.21E+15	2.45E+15	1.77E+15	87.16	13.19
Veracruz	10	2	20	2	2.74E+14	8.00E+14	5.03E+14	108.11	13.86
Zacatecas	44	12	27.3	11	2.26E+15	4.05E+15	3.08E+15	107.48	17.66
Total	1310	382	29.16	276					



Figura 19. Distribución geográfica de las 276 localidades geotérmicas en México.

unidad fue desmantelada cuando la red eléctrica alcanzó a esta villa, la zona sigue siendo considerada con un alto potencial geotérmico a ser explotado.

- **Tulecheck (Baja California Norte)**, esta zona está localizada alrededor de 15 km al Sur de la ciudad de Mexicali y 20 km al noroeste de Cerro Prieto, se espera sea desarrollado un recurso de baja entalpía, los estudios geotermométricos indican temperaturas entre 180 y 200°C.
- **Lago de Cuitzeo (Michoacán)**, Fores y Gutierrez comentan que algunas manifestaciones geotérmicas ocurren en las orillas de este Lago, presentando temperaturas geotermométricas de alrededor de 200°C, estiman que será desarrollado un recurso de baja entalpía aquí, se han realizado estudios geofísicos, geológicos y geoquímicos en 2010 con la intención de continuar con la exploración y la posible explotación del sitio.

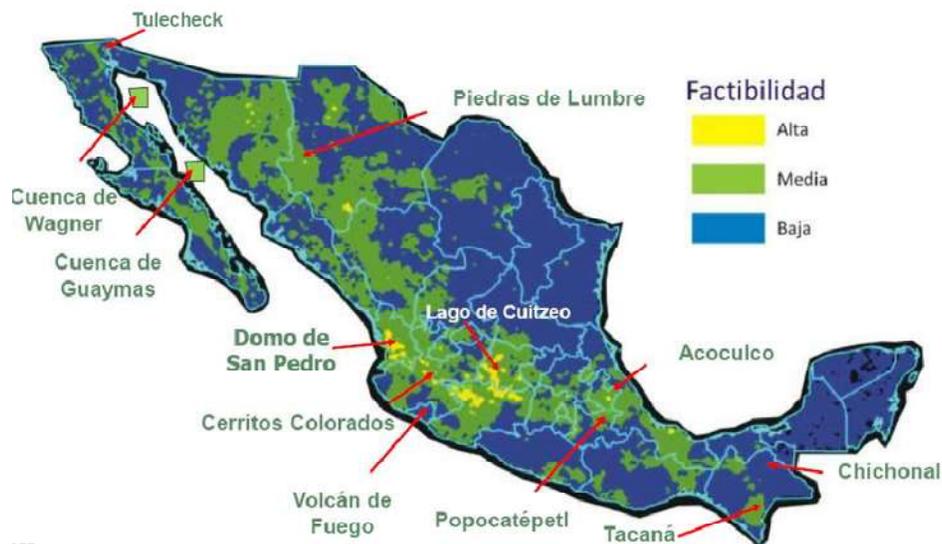


Figura 20. Mapa de recursos geotérmicos y zonas de exploración.

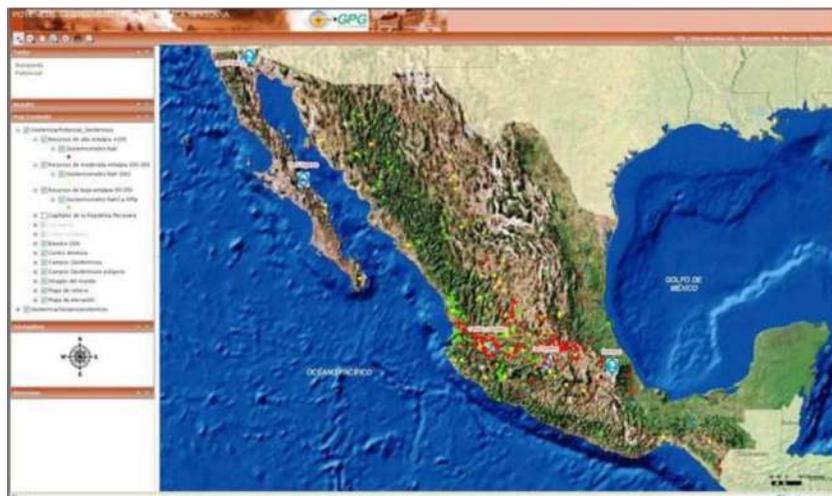


Figura 21. Localización de las manifestaciones termales y la ubicación de los campos geotérmicos.

Ordaz *et al.* [25], en 2011 publicaron una estimación volumétrica del potencial geotérmico total de México, con base en un catálogo de 1300 manifestaciones termales. En cada zona de manifestaciones se asumió una superficie de 1 kilómetro cuadrado, un espesor de 2 kilómetros, una porosidad de 15%, un factor de recuperación de calor del 25%, factores de eficiencia de conversión de energía térmica a eléctrica de 0.125 (150-200°C) y 0.11 (90-150°C). Con esos datos, calcularon las Reservas Probables (2P) para los recursos de moderada entalpía de 220.37 MWe y para los de baja de 212.70 MWe, dando un total de *Reservas Probables* de mediana y baja entalpía de 433.07 MWe de acuerdo a las simulaciones numéricas. Para los recursos de mediana entalpía existen *Reservas Posibles* (3P) de 881.48 MWe y los de baja entalpía por 849.61 MWe dando un total de Reservas posibles de mediana y baja entalpía de 1731.09 MWe de acuerdo a las simulaciones numéricas. También a partir de estos datos y los de los recursos de alta entalpía procesaron e integraron la información por medio del Sistema de Información Geográfica (SIG), dando como resultado la publicación del Mapa del Potencial Geotérmico de la República Mexicana en la intranet de la CFE (Figura 21 y Figura 22).



Figura 22. Mapa base y en recuadro acercamiento mayor a la zona de Los Azufres.

En Mayo de 2011 Hiriart [26], realizó una revisión de las zonas geotérmicas identificadas en México que podrían ser susceptibles de aprovecharse para generación distribuida, autoabastecimiento y/o cogeneración. La revisión de la literatura disponible le permitió identificar 55 zonas, que clasificó en tres categorías, con tres colores diferentes: rojo, verde y azul. En la categoría roja agrupó aquellas zonas cuya temperatura del subsuelo estimada es de 150°C o más, pero sin alcanzar temperaturas suficientemente altas para instalar en ellas plantas a condensación. Estas zonas son candidatos ideales para desarrollos de generación distribuida y autoconsumo con plantas de ciclo binario de media capacidad (mayor a 300 kW). En la categoría verde se agruparon las zonas con temperaturas entre 150°C y 95°C. En estas la propuesta es utilizar también plantas de ciclo binario pero de pequeña capacidad (50 a 300 kW) para generación distribuida.

Finalmente, en la categoría azul, se clasificaron los sitios con fluidos cuyas temperaturas son menores de 95°C. Estos recursos son prácticamente de utilidad nula para la generación de energía eléctrica, para aprovecharse en usos directos, además de probarse en ellos nuevas tecnologías para generación eléctrica en la modalidad de cogeneración. Estos tres grupos se presentan en la Tabla 6 y se enlistan

en la Tabla 7, incluyendo el estado en que se encuentran y la temperatura del subsuelo reportadas en la literatura. La ubicación aproximada se presenta en la Figura 23.

Tabla 6. Clasificación de recursos geotérmicos con temperaturas menores de 150°C en México.

Color	Temperatura estimada del yacimiento	Probable aplicación	Tecnología de las plantas
	>150°C	Plantas eléctricas mayores de 300 kW	Madura y disponible comercialmente
	95 a 149°C	Plantas eléctricas de 50 a 300 kW	Tecnologías probadas pero escasa disponibilidad comercial
	<95°C	Usos directos y pruebas para generación eléctrica	Nuevas tecnologías para generación eléctrica aun en desarrollo

Tabla 7. Zonas susceptibles de aprovechamiento.

No.	Localidad	Temperatura estimada en el subsuelo	Estado
1	Agua Caliente	150	Baja California Sur
2	La Joya (Punta Banda)	150	
3	Santispac	150	
4	El Centavito	70	
5	Los Cabos	130	
6	Laguna Salada (Mexicali)	130	Baja California
7	Puertecitos	48	
8	San Nicolás (El Volcán)	80	Baja California Sur
9	Saquicisrunde	130	
10	Piedras Rodadas	92	
11	Agua Caliente (La Paz)	50	
12	Santispac	44	
13	Agua Caliente (Comondú)	59	Chiapas
14	Las Golondrinas	161	
15	Geiser de Toliman	>200	
16	San Antonio El Bravo (Ojinaga)	>200	Chihuahua
17	Guachochi	110	
18	Piedras de Lumbre (Maguarichic)	155	
19	Ocampo	143	
20	San José del Molino	100	
21	13 de Octubre	93	Durango
22	Tamazula	158	
23	Santiago Papasquiaro	166	
24	Agua Caliente (Acapulco)	117	Guerrero
25	Cocoyul-San Marcos	161	
26	San Luis Autlán	100	
27	El Borbollón	117	
28	Amatlán de Cañas	161	Nayarit
29	El Molote	147	
30	San Diego-El Naranjo	167	
31	Xola	150	
32	San Marcos-Coyutlán	162	
33	Rosa Morada	144	Oaxaca
34	Agua Caliente (La Mata)	117	
35	Agua Caliente (Nisanda)	>200	Sonora
36	Arroyo Agua Caliente	121	
37	Agua Caliente (Anochi)	139	
38	San Jose de Pimas	131	
39	Tonibalbi-Moctezuma	159	
40	Agua Caliente (Tonichi)	114	

41	Bocadehuachi	126	
42	Esqueda-Fronteras	162	
43	Granados-Moctezuma	153	
44	Antelmo-Alamos	158	
45	Alamos	138	
46	Los Mezcañes	124	Zacatecas
47	Atotonilco	>200	
48	Ejido Trujillo	>200	
49	La Higuera-Huanusco	>200	Jalisco
50	La Media Luna-Apozol	108	
51	San Miguel-Apozol	111	
52	Pozo Bañuelos	110	
53	La Laguna	125	
54	El Rescoldo	162	
55	Moyagua de Estrada	163	

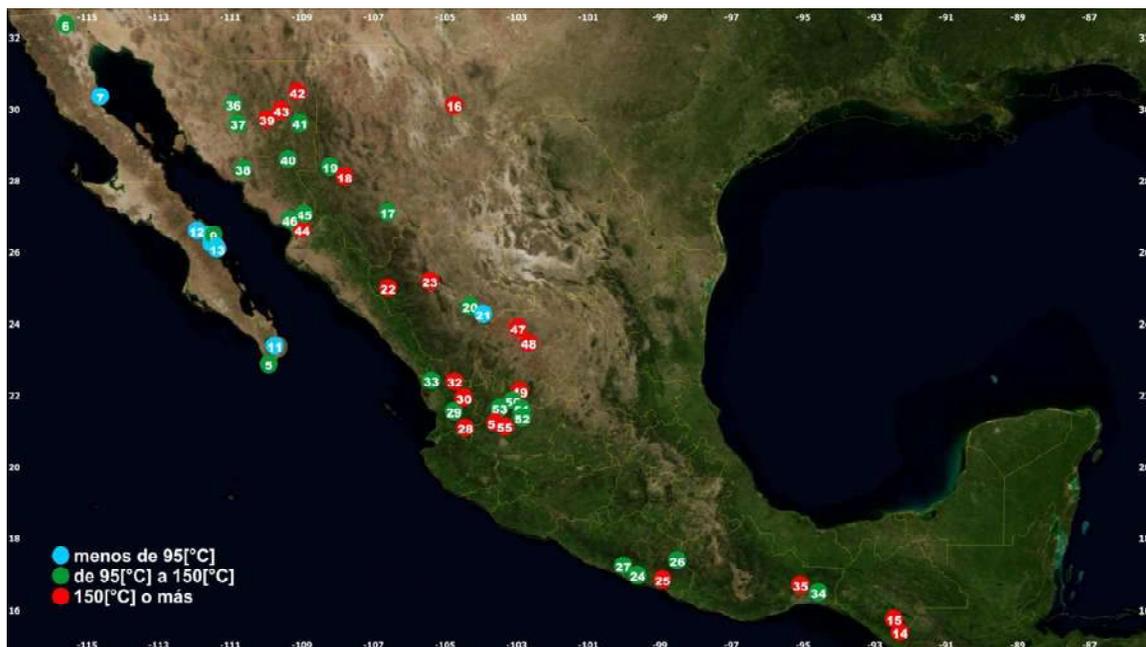


Figura 23. Ubicación de zonas geotérmicas susceptibles de aprovecharse para generación distribuida, autoabastecimiento y cogeneración en México.

En Mayo de 2011, Hiriart [27], muestra en su reporte 20 zonas con recursos geotérmicos hidrotermales (Figura 24), de donde se destaca la información de los siguientes estados, en los siguientes apartados.

1.4.1.1 Potencial geotérmico de Jalisco

La Soledad. En la zona se han identificado aproximadamente 30 manantiales termales algunos con desprendimiento de vapor y gases, asociadas con la falla La Soledad y otras de dirección NE-SW como la falla del Río Grande de Santiago, con temperaturas superficiales de 30 a 96 °C. Existe un pozo a 600 metros de profundidad, perforado por particulares en 1972, que reveló la presencia de epidota, mineral hidrotermal típico de yacimientos geotérmicos, alterando a las rocas andesíticas atravesadas. La máxima temperatura medida fue de 121°C.

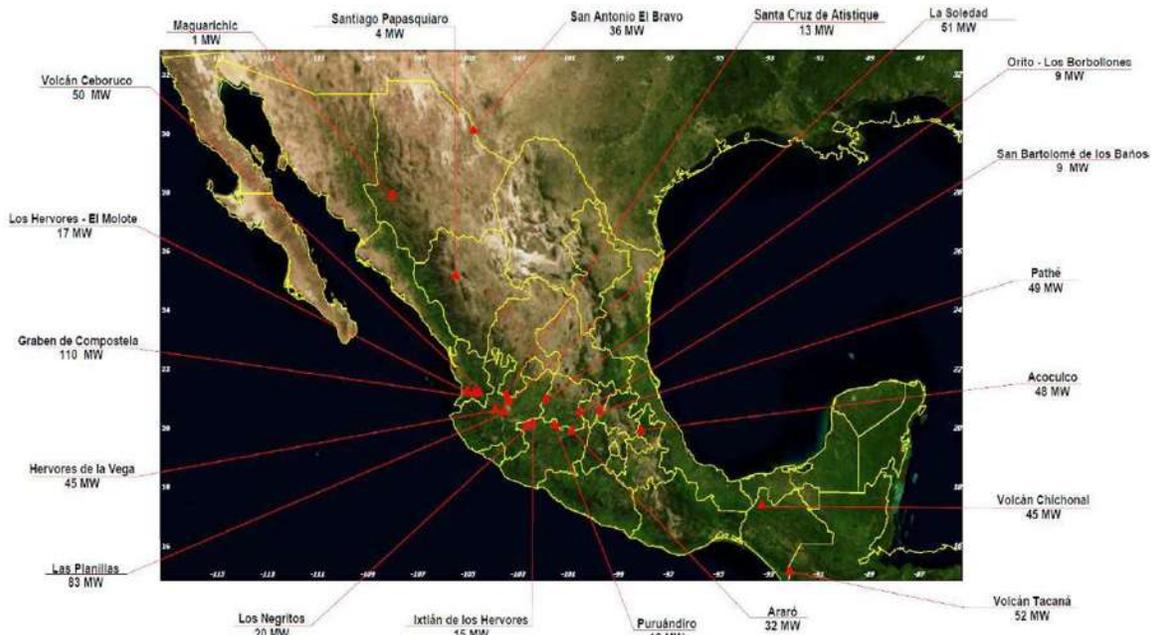


Figura 24. Localización de las 20 zonas geotérmicas seleccionadas [25].

Las Planillas. La zona geotérmica se encuentra en la cima de uno de los domos riolíticos conocidos como Las Planillas. El domo presenta un cráter de explosión en cuyo interior hay fumarolas con temperaturas superficiales máximas de 90 °C y en cuyo borde suroeste se encuentran manantiales con temperaturas de hasta 67 °C.

Cabe mencionar que esta zona se encuentra dentro del Bosque de La Primavera, que está definido como un área de protección forestal y refugio de la fauna silvestre, y que actualmente el gobierno del estado de Jalisco ha adoptado un plan de manejo para este bosque, por lo que cualquier futuro desarrollo geotérmico en esta zona tendría que cumplir con requisitos muy estrictos en materia de protección ambiental.

El orito – Los borbollones. Hay tres sistemas estructurales de dirección noroeste-sureste, noreste-sureste y norte-sur que afectan a toda la columna litológica, siendo el segundo el más reciente. En la zona se identificaron 23 manifestaciones termales, 15 de las cuales se agrupan en el área conocida como Los Borbollones, que es la más importante. Esta presenta manantiales, hervideros, suelos calientes y tres chorros de agua a presión, con temperaturas superficiales entre 49 y 97 °C, aflorando en una superficie de 2.5 km² asociada con la intersección de los tres sistemas estructurales mencionados.

Hervores de la Vega. La principal zona de manantiales, con ocho de ellos, se ubica en el flanco oriental de la Sierra de la Laja. Los manantiales afloran en un conglomerado reciente, con depósitos de travertino a su alrededor. Presentan temperaturas superficiales de 82 a 97 °C. Existen también otros manantiales al sureste, en los poblados de Agua Caliente y Buenavista, que podrían ser una descarga de los de Hervores de la Vega.

Potencial geotérmico de Hidalgo

Pathe. Este sitio cuenta con una amplia zona con manifestaciones termales superficiales, entre ellas manantiales, géiseres extintos, y zonas de alteración hidrotermal. Los manantiales tienen temperaturas

superficiales de 28 a 39 °C. En pozos y barrenos perforados por la CFE en la década de los cincuenta la temperatura común fue de 150°C a unos 300 metros de profundidad, aunque se reporta un pozo (el pozo 1) con temperatura mayor de 200°C a 230 metros de profundidad. De este pozo aún fluye agua a 95°C de temperatura.

Potencial geotérmico de Nayarit

Los Hervores - el Molote. En la zona se identificaron tres grupos de manantiales termales: El Molote, en la parte central, La Ínsula-Los Hervores, ubicada a unos 7 km al oeste del rancho El Molote, y Agua Caliente-Jamurca localizada al sur y sureste del poblado de Las Varas. El grupo de El Molote está constituido por 14 manantiales distribuidos en una superficie de 3 km² con temperaturas superficiales entre 65 y 91 °C. El grupo de La Ínsula-Los Hervores presenta temperaturas superficiales más bajas (28 °C). El tercer grupo de manantiales tiene temperaturas superficiales de 49°C.

Volcán Ceboruco. Las manifestaciones termales son fumarolas, suelos calientes y manantiales, aunque sólo las dos primeras están directamente asociadas con el volcán. Las fumarolas del volcán presentan temperaturas entre 82 y 92 °C.

Graben de Compostela. Hay pocos manantiales termales cercanos a los domos, y presentan temperaturas superficiales de 34 °C. Sin embargo, un pozo exploratorio perforado por la CFE en 1994 (pozo CB-3), ubicado a un kilómetro al noreste de la base de los domos, produjo pequeñas cantidades de agua de tipo clorurado sódico y se le midió una temperatura de 209 °C al fondo (1911 metros).

Potencial geotérmico de Chihuahua

San Antonio el Bravo (Ojinaga). La zona incluye 11 manantiales termales que afloran en dos áreas. Una puede seguirse a lo largo de unos 300 metros en las márgenes del Arroyo Ojo Caliente, con temperaturas entre 36 y 91 °C, depósitos de travertino y sales y desprendimientos de H₂S. En esta área el termalismo está asociado a la Falla Ojo Caliente, de dirección norte-sur. La otra área se conoce como El Infiernito, con temperaturas menores (36-60 °C) y también con depósitos de travertino.

Maguarichic. El área de interés y las manifestaciones termales se ubican prácticamente en la parte superior de un potente paquete volcánico de composición intermedia. Se han identificado 96 manifestaciones termales, con temperaturas de 30 a 94 °C y una media de 80 °C. Los manantiales tienen un gasto conjunto estimado en 47 litros por segundo, y varios de ellos presentan desprendimiento de gases, depósitos de sales y extensas zonas de alteración hidrotermal. Las manifestaciones se agrupan en ocho áreas termales, de las cuales las más importantes son las de Recubichi y Piedras de Lumbre, que concentran el 85% de las manifestaciones superficiales con una superficie conjunta de unos 7 km². En todo caso se trataría de un yacimiento de temperatura baja a intermedia, que sin embargo podría ser aprovechado para generar electricidad con plantas de ciclo binario, como ya lo hizo durante varios años la CFE.

Potencial geotérmico de Chiapas

Volcán Tacaná. El Tacaná es un estratovolcán activo que forma parte del cinturón volcánico centroamericano y cuya formación se debe a la subducción de la Placa de Cocos debajo de la de Norteamérica. La actividad termal está representada por fumarolas y manantiales. Las temperaturas superficiales están entre 82 y 94 °C. Los manantiales termales se localizan sobre el flanco noroeste del volcán, con temperaturas de 40 a 55 °C. Taran y Peiffer, en el 2009 [26], realizaron un estudio de la zona geotérmica del Chichonal, determinaron que básicamente las manifestaciones termales son

fumarolas ubicadas en el cráter principal del volcán y manantiales termales en sus flancos. CFE anteriormente hizo un estudio en 1982, meses antes de la última erupción, para esas fechas la zona tenían temperaturas superficiales entre 93 y 98 °C. Actualmente los manantiales termales se presentan en cinco grupos sobre los flancos del volcán, a una distancia de entre 2 y 3 km en línea recta de la cima. Se encuentran en las partes superiores de los cañones donde las aguas calientes se mezclan con agua meteórica superficial y forman arroyos que fluyen hacia el Río Magdalena. Las temperaturas superficiales van de los 50 a los 74 °C. Una estimación reciente concluye que el calor total descargado por las aguas termales puede estar entre 175 y 210 MW térmicos.

Potencial geotérmico de Aguascalientes

En 2005 Iglesias et al [28], estimaron las reservas geotérmicas de 83% de los sistemas geotérmicos del estado mexicano de Aguascalientes. Las reservas estimadas totales se encuentran entre 0.68×10^{16} y 1.21×10^{16} kJ (1.89×10^9 y 3.35×10^9 MWh), con un 90% de certidumbre. Encontraron que las 64 manifestaciones geotérmicas conocidas se agrupan en 17 sistemas geotérmicos. Estimaron también la energía térmica correspondiente a 14 de estos sistemas, la media de la energía geotérmica de los sistemas evaluados oscila entre 6.20×10^{14} a 1.01×10^{16} kJ, y la temperatura más probable de los yacimientos está entre 55 y 161 °C.

Potencial geotérmico de Guanajuato

San Bartolomé de los baños. La zona ha sido afectada por un sistema estructural de dirección nort-sur, conocido como sistema de fallas Querétaro, al cual pertenece la falla local San Bartolomé. Hay tres principales áreas de manantiales y alteración hidrotermal en la zona, conocidas como Laguna El Salitre, Marroquín y San Bartolomé de los Baños, y temperaturas superficiales entre 53 y 95 °C, en algunos casos con desprendimiento de gases.

Potencial geotérmico de Durango

Santiago Papasquiaro. Se identificaron en la zona y sus alrededores 12 manantiales termales concentrados en cinco localidades, con temperaturas entre 33 y 75 °C. Las de mayor temperatura son las conocidas como Sandías y Los Hervideros, ambas prácticamente en las márgenes del Río Tepehuanos.

Potencial geotérmico de Baja California

En 2011 la Universidad Politécnica de Baja California [29], realizó un estudio para hacer un inventario de las zonas geotérmicas de baja entalpía en la península de Baja California, su estudio se basó en 11 zonas de las cuales estimaron un potencial de 30 MW con temperaturas del recurso geotérmico entre 80 y 120 °C.

Potencial geotérmico en Sonora

En 2012 Almirudis et al. [30], de acuerdo a estimaciones hechas anteriormente en la falla Cerro Prieto de temperaturas entre 126 y 192 °C, analizaron los manantiales de la zona centro-este del estado de Sonora, México (Figura 29 y Figura 30). En sus estimaciones obtuvieron temperaturas superficiales entre las que se encontraban las más altas en el orden de 68 +/- 0.6 °C. En el escenario más pesimista obtuvieron temperaturas menores a 100 °C y en el más favorable algunas mayores a 200 °C, las mediciones fueron desde una mínima de 98 °C hasta una máxima de 336.4 °C.

Potencial geotérmico de Michoacán

Araró. La zona se encuentra al interior de una depresión tectónica de dirección general este-oeste, conocida como Graben de Cuitzeo-Maravatío, que parece ser parte de una fosa tectónica más grande,

que se extiende desde Chapala, Jal., hasta Tepetongo, Méx., con temperaturas superficiales entre 31 y 98 °C. En la zona se encuentran manantiales termales con escape de gases y zonas de alteración, agrupados en varias áreas, de las cuales la más importante es la conocida como San Nicolás Zimirao con temperaturas entre 48-99 °C en una superficie de 10 hectáreas.

Ixtlan de los Hervores. La zona se ubica en la prolongación oriental del Graben de Chapala, en la que se observa una serie de fallas normales de dirección noroeste-sureste a este-oeste, algunas de las cuales parecen actuar como conductoras de los fluidos hidrotermales. Las manifestaciones termales ocurren en la intersección entre la Falla Ixtlán-Encinal y la Falla Nogales, entre los poblados de Ixtlán de los Hervores y El Salitre a lo largo de unos 2 km. Consisten en manantiales termales, pozos de agua caliente y volcanes de lodo con temperaturas superficiales entre 48 y 94 °C.

Los Negritos. Las manifestaciones termales son manantiales, algunas fumarolas y volcanes de lodo, que parecen relacionarse con el cruce de dos estructuras, determinadas por estudios geofísicos, una de dirección este-oeste (Falla El Platanal) y otra de dirección noreste-suroeste (Falla Los Negritos). Las temperaturas superficiales están entre 30 y 82 °C.

Puruándiro. En esta zona afloran abundantes manantiales en un área de 0.7 km² con temperaturas superficiales entre 30 y 84 °C y un gasto conjunto entre 5 y 10 litros por segundo, asociados a estructuras de dirección este-oeste; hay diversos pozos para riego agrícola en la periferia con agua entre 40 y 60°C. Se identificaron también zonas de alteración hidrotermal asociadas a algunos de los manantiales y hervideros.

1.5 Justificación y Motivación

El consumo cada vez mayor de energía y consecuente la generación de gases de efecto invernadero (GEI) se han convertido en dos grandes desafíos globales para la humanidad en la actualidad. Para hacer frente a estos problemas críticos, nuevas fuentes de suministro de energía, nuevos medios de producción de energía, distribución y consumo se están proponiendo día con día. Sin embargo, la adopción de estos métodos siempre implica un enorme y revolucionario cambio en nuestros sistemas existentes de energía, que son de vital importancia para la economía y la sociedad.

El calor terrestre es una fuente de energía que se puede considerar inagotable para la producción de calor y de electricidad, que no depende de las condiciones climatológicas, de la estación anual, del momento del día ni del viento. La diversidad de temperaturas de los recursos geotérmicos permite un gran número de posibilidades para su utilización. La energía geotérmica representa una respuesta local, ecológica y eficiente para reducir costos energéticos. Así pues, la energía geotérmica se muestra como una de las energías más prometedoras y despierta un interés creciente en el conjunto de las estrategias que promueven la explotación de fuentes de energía versátiles y renovables [12].

Por otra parte, México tiene una gran cantidad de recursos geotérmicos que aún no son aprovechados, siendo estos los recursos de media y baja entalpía, debido principalmente a que la explotación de la energía geotérmica se enfoca a los campos de alta entalpía para la generación de electricidad. El caso de Michoacán no es la excepción, ya que es el segundo productor principal de electricidad en base a energía geotérmica en México. Sin embargo, como el uso de la energía geotérmica se centra en la producción de electricidad se ha dejado a un lado las aplicaciones con uso directo de calor geotérmico.

Así, el país tiene una gran oportunidad, no sólo de satisfacer sus necesidades energéticas, sino de desarrollar, en los próximos años, tecnología propia en este campo. De lo anterior se deriva la necesidad de estudiar la situación actual y las perspectivas de desarrollo de dicha fuente de energía, con miras a promover e implantar las medidas necesarias que permitan disminuir la fuerte dependencia que hoy tiene el país de los hidrocarburos.

Como parte de la solución a los problemas antes mencionados y con el fin de hacer uso completo de la energía se propone un sistema de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpía para maximizar la cantidad de energía utilizada. Este sistema de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpía es propuesto para producir tanto electricidad y energía térmica utilizable con alta eficiencia y beneficios económicos. Con el uso del fluido geotérmico no solo se puede generar electricidad, sino otros productos por uso directo lo que representa mejores ventajas económicas. El rendimiento de estas plantas puede llegar hasta 60 % y la contaminación del ambiente puede ser disminuida en esa misma proporción.

En base a lo anterior, puede apreciarse que la propuesta es innovadora y con alto potencial de ser desarrollada. El estudio detallado de esta forma de uso de energía geotérmica detonará la utilización de los esquemas de suministro simultáneo de energía y el uso en mayor medida de los recursos geotérmicos de mediana y baja entalpía. Esta propuesta será pionera debido a que se incursiona en la aplicación inmediata de este tipo de plantas, facilitando la integración a una aplicación en particular y permitiendo la obtención de datos e información que permitan cuantificar de manera precisa los beneficios de estas instalaciones, así como dar confianza a empresarios para utilizar estos esquemas descentralizados.

Actualmente, existen pocos proyectos en el mundo donde se utilizan los recursos geotérmicos para múltiples aplicaciones como lo son la generación de electricidad, calor y frío, es decir, no es común el uso del recurso geotérmico tras ya haber sido utilizado en una aplicación, y menos común utilizarlo en diferentes niveles térmicos que van desde una mayor demanda de temperatura a una menor, en otras palabras, el uso de la energía geotérmica en cascada se ha implementado muy poco de manera común. Así pues, el uso en cascada de la energía geotérmica, combinado con el concepto de plantas de poli-generación puede representar una alternativa adicional a la diversificación de la matriz energética y al uso de los recursos geotérmicos de mediana y baja entalpía.

1.6 Objetivos y alcance

El objetivo principal de este trabajo es el de desarrollar una metodología de integración para plantas de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpía, con la finalidad de utilizar los recursos geotérmicos no solo para generación de electricidad sino también para la obtención de otros productos por uso directo de la energía geotérmica.

1.6.1 Objetivos Específicos.

- a) Demostrar la viabilidad de utilizar los recursos geotérmicos de mediana y baja entalpía no sólo para la generación eléctrica, sino también mediante la obtención de productos mediante el uso directo de la energía geotérmica, en una integración en cascada que incrementa el uso eficiente y racional de los recursos geotérmicos.

- b) Desarrollo de un modelo de desarrollo tecnológico que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- c) Desarrollar una aproximación teórica para el análisis de los sistemas de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpía.
- d) Probar las ventajas operativas de un esquema de generación eléctrica que puede ser empleado en los planes de generación distribuida en sistemas locales o globales.
- e) Proporcionar los elementos de un modelo de generación de energía eléctrica alineado con las prioridades de las locaciones donde se encuentra el recurso al ser un método de producción de electricidad basado en el aprovechamiento sustentable de las fuentes geotérmicas de energía.

1.7 Estructura de la tesis

Esta tesis se estructura en base a los siguientes capítulos:

En el Capítulo 1, se hace una introducción a la problemática del abastecimiento de la energía y la contaminación ambiental, como alternativa posible para ayudar a mitigar estos problemas, se propone el uso de las energías renovables, en particular la energía geotérmica. Se ha destacado la importancia de la energía geotérmica de mediana y baja entalpía para la producción de energía eléctrica y usos no eléctricos. También se realizó una revisión del estado del arte para los recursos geotérmicos en México, se justifica el trabajo y los factores que motivan a la realización de la investigación. Finalmente, se define el objetivo general y los objetivos específicos de esta tesis.

El Capítulo 2, está dedicado a establecer el concepto del uso en cascada de la energía geotérmica así como comprender los arreglos básicos de estos sistemas, sus rendimientos energéticos y exergéticos. También se realizó una revisión de las aplicaciones de los diferentes sistemas con el uso en cascada de la energía geotérmica alrededor del mundo para determinar el desarrollo e implantación de este tipo de sistemas. Finalmente, se abordan los beneficios potenciales de utilizar los sistemas en cascada de la energía geotérmica.

En el Capítulo 3, se investiga el rendimiento energético y exergético de varios arreglos de poli-generación impulsados por recursos geotérmicos de mediana y baja temperatura. Se evaluó y comparó diferentes esquemas de acoplamiento, identificando las tecnologías térmicas adecuadas para cada tipo de disposición. El sistema de poli-generación se consideró para producir potencia, refrigeración y calor para usos directos para variaciones de esquemas de acoplamiento en serie y paralelos con diferentes alternativas de ORC y máquinas de enfriamiento por absorción. El estudio se realizó considerando un rango de temperatura del recurso geotérmico bajo a medio de 80 °C a 150 °C.

En el Capítulo 4, se propone y presenta una metodología para seleccionar los equipos y sistemas idóneos para integrar una planta de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía geotérmica. Se realizan modelos energéticos y económicos para evaluar los dispositivos disponibles comercialmente. Finalmente se realiza un análisis de sensibilidad para determinar la viabilidad y fiabilidad de los sistemas en cascada de la energía geotérmica.

En el Capítulo 5, se propone el diseño de los sistemas y equipos que componen una planta de poli-generación mediante el uso en cascada, con la intención de mejorar el rendimiento y los costos del sistema de poli-generación. Simultáneamente se realizó una optimización del sistema multi-producto

con el uso en cascada de la energía geotérmica. Finalmente se presentan las conclusiones más relevantes y trabajos futuros a desarrollar en esta línea de investigación.

En el Capítulo 6, se realizan simulaciones de la planta de poli-generación en cascada en condiciones de diseño y fuera de diseño para estimar el comportamiento del sistema con la finalidad de identificar las alternativas.

1.8 Comentarios y aspectos destacables

Los numerosos estudios realizados a lo largo de los últimos 30 años, si bien varían en función del tamaño del territorio analizado y del espectro de calor estudiado, coinciden en resaltar el gran potencial geotérmico con el que cuenta el país.

El interés reciente en los recursos de mediana y baja entalpía ha complementado la información y el conocimiento más cercano del potencial geotérmico nacional.

Las regiones geográficas con mayor potencial geotérmico de mediana y baja entalpía se ubican en la zona centro de la República Mexicana, donde se encuentra el eje Neovolcánico Transmexicano o también conocido como la Faja Volcánica Mexicana (FVM) y los estados de Baja California Sur, Sonora y Chihuahua.

Cabe señalar que México es ya uno de los países que mayor uso hace de este recurso renovable, lo que demuestra la competitividad de esta tecnología frente a las tecnologías convencionales. Sin embargo, también es necesario señalar que, dentro de este selecto grupo de países “geotérmicos” es uno de los que menor aprovechamiento tiene de los recursos de mediana y baja entalpía.

Una de las zonas con mejor potencial de explotación de los recursos geotérmicos de mediana y baja entalpía es la cuenca del Lago de Cuitzeo, esta zona cuenta con el recurso geotérmico, la situación social, ambiental y los productos idóneos para la explotación de dicho recurso. México está en proceso de mejorar significativamente su marco regulatorio y legal a efecto de impulsar el desarrollo de tecnologías basadas en Energía geotérmica, y asegurar que éstas obtengan la retribución económica correspondiente.

1.8.1 Identificación de líneas de investigación

Una optimización multi-objetivo de diseño tecno-económico y en estado estable de los ciclos del sistema de poli-generación se puede hacer con el modelo desarrollado. Algunas de las recomendaciones para mejorar la investigación actual son las siguientes:

Modelado de los componentes

En este trabajo, la mayoría de los componentes se modelaron con correlaciones muy utilizadas, pero se debe hacer más trabajo para desarrollar modelos universalmente aplicables para flujos en dos fases en intercambiadores de calor convencionales y particularmente de placas. Para algunos componentes, existen solo pocos datos experimentales, por lo que definitivamente se necesita más experimentación. También es importante que la configuración de los experimentos y la definición de números no dimensionales sean claramente descritos y que las mediciones obtenidas también están disponibles

para otros investigadores. Si se cumplen estas condiciones, es posible combinar los datos experimentales de diferentes autores para desarrollar nuevas correlaciones. Éste último paso no es fácil, porque las correlaciones deben basarse en un modelo físico y los datos experimentales deben utilizarse para encontrar el valor de algunos de los parámetros correlacionados. Una forma diferente de mejorar los modelos de componentes es una cooperación con la industria. Las empresas que construyen o usan estos componentes, tienen experiencia con ellos y probablemente tengan modelos más precisos que los disponibles en la literatura científica y tienen una gran cantidad de datos experimentales.

Planta de poli-generación dinámica

En este trabajo se realiza una optimización del sistema de estado estable. En el caso de una planta combinada de calor y energía, para la demanda de calor generalmente se deben realizar adaptaciones y constantes para que las simulaciones dinámicas y las optimizaciones sean posibles. Estos puntos de estado estacionario a menudo no serán el punto de diseño y se necesitan modelos de carga parcial. Por lo tanto, dos cuestiones principales deben abordarse para modelar y optimizar una planta de poli-generación dinámica: el comportamiento de los componentes a carga parcial y las adaptaciones a la optimización. El problema de optimización también debe ser redefinido. Un año de referencia de datos deben definirse y tienen que dividirse en un número representativo de intervalos de tiempo, de modo que el sistema se puede asumir que está en estado estable en dicho intervalo de tiempo. El objetivo de la optimización consiste en encontrar el diseño óptimo y los parámetros de operación óptimos del sistema para maximizar los beneficios del sistema. El número de variables de optimización aumentarán fuertemente, no solo debido al aumento de la complejidad de los modelos de los componentes, también debido a la adición de variables de operación extras. El caudal másico del fluido de trabajo, el caudal másico del fluido de enfriamiento, la velocidad de rotación de los ventiladores, etc., pueden ser diferentes en cada intervalo de tiempo. En lugar de calcular la salida del sistema una vez, se debe hacer para cada intervalo de tiempo.

Fluidos de trabajo y mezclas.

El uso de mezclas es una de las mejoras propuestas para mejorar la eficiencia de los ciclos ORC. Desafortunadamente, REFPROP, que es el programa de referencia para las propiedades de los fluidos de trabajo, solo puede manejar un número limitado de mezclas y, a menudo, las correlaciones no son numéricamente estables. En la nueva versión de REFPROP, se han agregado más mezclas y se presta atención a la estabilidad de las correlaciones. Un trabajo posterior podrá ser incluir mezclas de fluidos y compararlos con los resultados obtenidos en este estudio.

Un problema importante en las plantas de energía geotérmica es el ensuciamiento y la corrosión del equipo debido a la alta salinidad de la salmuera. Otro trabajo podría ser predecir la evolución de la presión y la temperatura de la salmuera para predecir la cantidad de incrustaciones y corrosión que ocurre en los intercambiadores de calor y su impacto económico.

Capítulo 2. Uso en cascada de la energía geotérmica

El consumo de energía primaria en el mundo crece de manera importante año con año, esto debido al crecimiento de la población, el desarrollo económico y la cobertura de las necesidades energéticas de la población. Este consumo de energía está basado en su mayor proporción por el uso de combustibles fósiles, aproximadamente el 86%, los cuales se están agotando y por otra parte generan grandes cantidades de CO₂, que contribuye en gran proporción al calentamiento global [31]. Esto ha originado que los ojos del mundo volteen a la búsqueda de diferentes alternativas para el suministro confiable de energía y la reducción del impacto ambiental. Entre tales alternativas se encuentran los recursos energéticos renovables. En este sentido, una de las energías renovables que destaca por su madurez tecnológica, es la energía geotérmica, considerada renovable por la enorme cantidad de energía disponible. Esta energía es una de las alternativas energéticas con mayor potencial y actualmente es explotada en 24 países para producir electricidad y en 74 países más aplicada a diversos usos directos [32-34].

La energía geotérmica se puede clasificar de acuerdo al nivel energético que contiene. Se le denomina de alta entalpía, cuando el fluido geotérmico se encuentra en condiciones de alta presión y temperatura, usualmente superior a los 150 °C. Cuando el fluido geotérmico se encuentra a temperaturas situadas entre los 100 °C y los 150 °C es conocida como de mediana entalpía. Se le conoce como de baja entalpía, cuando la temperatura del fluido geotérmico es inferior a los 100 °C, [34-35]. El recurso de mediana entalpía presenta un gran potencial que ha sido explotado muy poco, teniendo la posibilidad de ser utilizado para la producción de potencia mediante tecnologías como ciclo ORC (Ciclo Rankine Orgánico) y ciclo KC (Ciclo Kalina) y para diversos servicios mediante el uso directo del calor [36].

El uso directo de la energía geotérmica es la forma más antigua y versátil de aprovechar la energía geotérmica de mediana y baja entalpía, destacando actualmente: calefacción directa o mediante bombas de calor, acuicultura, secado de cultivos agrícolas, cultivo de plantas y vegetales en invernaderos, calor para procesos industriales de la industria del papel y cemento, procesado de alimentos, fermentación, teñido de telas, fusión de nieve, refrigeración de espacios y balneología, principalmente [37].

Como una medida para potenciar el uso de los recursos de mediana y baja entalpía, tanto para la generación eléctrica como para usos directos, se ha propuesto el uso en cascada de la energía geotérmica. Este concepto surge a mediados de los años 80's con el fin de hacer un uso más efectivo de la energía geotérmica a diferentes niveles de temperatura. En términos generales, la utilización en cascada de la energía no es más que un arreglo razonable del uso de la energía a diferentes niveles térmicos para obtener diversos productos [38 -40]. El uso en cascada corresponde a un caso particular de los sistemas de energía integrados, que también aparecen bajo el nombre de sistemas de poligeneración, que se centran en el principio de utilizar uno o varios recursos energéticos para proporcionar diversos productos de forma más eficiente que los sistemas convencionales [38].

De acuerdo a lo anterior, el propósito principal de este capítulo es establecer el concepto del uso en cascada de la energía geotérmica, presentar una revisión exhaustiva del uso integrado del recurso

geotérmico bajo el concepto denominado uso en cascada, para generación de energía eléctrica y aprovechamiento secuencial del calor geotérmico para diversos usos directos o mediante uso de tecnologías activadas térmicamente. Se demostrará que el concepto de utilización en cascada es una forma efectiva para potenciar el uso de los recursos geotérmicos de media y baja entalpía y se analizaron los beneficios potenciales suficientes para proponer la implementación de estos sistemas a situaciones particulares.

2.1 El concepto del uso en cascada

En las aplicaciones destinadas a la generación de energía eléctrica utilizando recursos geotérmicos, incluyendo los usos directos, el fluido geotérmico cede su calor conforme el proceso avanza y sufre un progresivo descenso en su temperatura. Debido a esto el recurso sufre un descenso en su calidad energética, esto no quiere decir que, al finalizar el proceso el fluido pierda por completo su energía. En el caso de la generación eléctrica, en muchos de los casos es posible que el nivel de energía del fluido a la salida del proceso tenga la suficiente calidad termodinámica y pueda servir a un proceso secuencial en un segundo, tercer y hasta cuarto nivel de temperatura para aplicaciones directas tales como calefacción, suministro de agua caliente, aprovechamiento intermedio de procesos de secado de alimentos o maderas, y otros usos directos del calor geotérmico como acuicultura o balneología, [41].

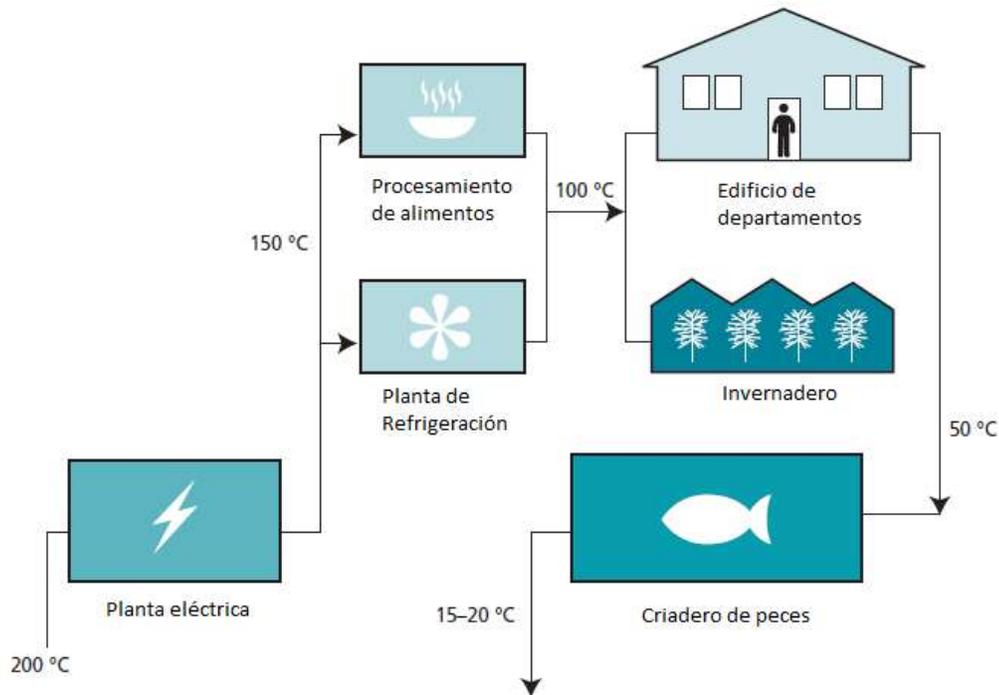


Figura 25. Esquema conceptual del uso en cascada de la energía geotérmica.

El concepto del uso en cascada, se puede describir básicamente como, el aprovechamiento de la energía geotérmica a diferentes niveles térmicos en procesos secuenciales, como ejemplo típico se muestra la Figura 25. En este ejemplo, en el primer nivel de la cascada se utiliza el recurso geotérmico generalmente de mediana entalpía para la producción de electricidad, posteriormente el recurso geotérmico que sale de este proceso alimenta el segundo nivel de la cascada, para la generación de frío en procesos de refrigeración y calor para el procesamiento de alimentos. Tras este segundo uso, el

fluido puede ser aprovechado para otros fines con menores requerimientos de temperatura como calefacción de edificios e invernaderos formando el tercer nivel de la cascada, para finalmente formar un cuarto nivel en aplicaciones como criadero de peces. En el ejemplo de la Figura 25, se muestran las temperaturas típicas para la generación de electricidad, generación de frío y calor. De manera general, el número de niveles térmicos útiles está determinado por el acoplamiento entre la temperatura definida por las aplicaciones posibles, y el rango de temperaturas entre la temperatura inicial del recurso geotérmico y una temperatura de referencia que usualmente está por encima de la temperatura ambiente.

Por otro lado, debido al alto consumo de energía, es necesario utilizar procesos que optimicen la energía, tal es el caso de los sistemas de poli-generación que pueden ser integrados incluso para utilizar la energía geotérmica. La poli-generación se define como la producción conjunta de dos o más servicios energéticos y/o productos manufacturados, realizada de forma simultánea y buscando aprovechar al máximo el potencial termodinámico de los recursos consumidos. La Fig. 26 muestra una representación genérica de los sistemas de poli-generación que se caracterizan por ser siempre multi-producto, a veces multi-recurso y por evitar en lo posible la formación de residuos [42]. La integración energética de procesos es una metodología orientada al diseño y mejora de los sistemas de producción, efectuando el análisis termodinámico y económico desde los procesos individuales hasta la planta completa, y enfatizando el uso eficiente de los recursos consumidos. Actualmente existen sistemas muy conocidos de sistemas multi-producto, tales como la cogeneración y la tri-generación. En los sistemas de cogeneración se produce de manera simultánea calor y electricidad a partir de un recurso, mientras que en la tri-generación se produce adicionalmente frío.



Figura 26. Esquema conceptual de un sistema de poli-generación.

2.2 Revisión de aplicaciones

Para determinar el estado del arte de los sistemas integrados que utilizan la energía geotérmica en forma de cascada, se realizó una búsqueda exhaustiva en diversas fuentes de información, tales como bases de datos de artículos científicos, revistas técnicas, memorias de congresos, reportes técnicos, etc. En cada fuente consultada se hizo énfasis en el uso en cascada de la energía geotérmica, identificando las características del recurso geotérmico, los diferentes niveles energéticos empleados, tecnologías empleadas y los productos generados, el grado de utilización del recurso, los costos de las tecnologías y costos de inversión de la instalación en general.

En particular, la revisión se enfocó principalmente en los proyectos con mayor impacto que están en desarrollo o que ya han sido instalados a nivel mundial, donde se utiliza la energía geotérmica en forma

de cascada. También se tomaron en consideración los proyectos e investigaciones teóricas que aún no se han implementado, que pueden contener información relevante para propuestas futuras. Los sistemas, investigaciones y proyectos encontrados se organizaron en el primer nivel por continente y en un subnivel por países. Esta organización es con la intención de ubicar rápidamente los sistemas, resaltar su trascendencia y las aplicaciones del uso en cascada de la energía geotérmica orientada hacia el uso de los recursos geotérmicos de mediana y baja entalpía.

2.2.1 África

En este continente se han identificado casos de estudio del uso en cascada de la energía geotérmica básicamente para su aplicación en comunidades rurales o aldeas cercanas a los campos con recurso geotérmico.

Kenia. En Eburru Kenia, un estudio propuesto para utilizar la energía geotérmica de dos pozos de poca profundidad en el secado de productos agrícolas, calefacción de invernaderos, purificación de miel e incubación de aves de corral. También se propuso incorporar una instalación recreativa de vapor para sauna y cubrir necesidades de agua potable. En particular, se llevó a cabo la evaluación del potencial de la energía geotérmica y el estudio de la química de los condensados del vapor de los pozos. También se realizó la evaluación de la viabilidad técnica, así como el planteamiento de perforar un pozo nuevo para el proyecto como suplemento adicional de energía. La temperatura del recurso geotérmico en el cabezal de los pozos es de 89.6 °C y las aplicaciones tienen como límite temperaturas por arriba de los 50 °C. El costo de la implementación de este pequeño proyecto se ha estimado en 40,000 USD, [43].

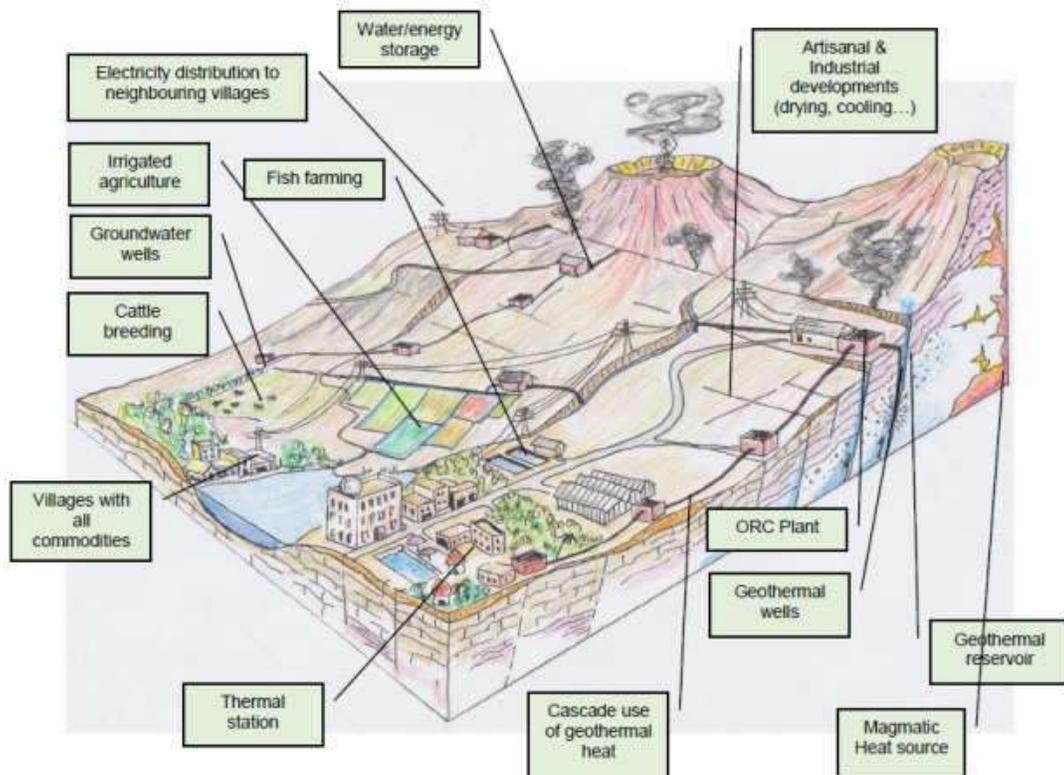


Figura 27. Esquema conceptual de una Villa Geotérmica a desarrollarse en Samburu, Kenia [14].

Otro estudio reciente, se documenta para la comunidad de Barrier (Distrito de Samburu) donde se propone para el desarrollo de las zonas rurales un concepto conocido como Villa Geotérmica. Este concepto toma en consideración un desarrollo geotérmico integral para satisfacer la demanda de energía eléctrica y térmica de asentamientos humanos ubicados cerca del origen del recurso geotérmico, [44]. El concepto Villa Geotérmica como forma integral del uso en cascada, incluye la producción de electricidad mediante plantas ORC de tamaño pequeño, el uso de pozos geotérmicos poco profundos, la producción de calor para el secado de alimentos, la producción de fluidos geotérmicos para aplicaciones sanitarias y otros usos como el ecoturismo, el bombeo de las aguas subterráneas para la alimentación de ganado y el riego de los pequeños perímetros para los cultivos y producción de hortalizas. Para el sistema integral, se considera que se contará con una temperatura del recurso geotérmico de 120 °C con pozos perforados a una profundidad de 500 m y un flujo de 55.6 l/s con la capacidad de producir entre 1 y 2 MW de electricidad. La Figura 27, muestra el esquema conceptual de la Villa Geotérmica.

2.2.2 América

En el continente Americano varios países explotan la energía geotérmica, cuentan con plantas de generación eléctrica y también reportan el uso directo para servicios, entre los países con mayor uso de la energía geotérmica se encuentran Canadá, México y los Estados Unidos.

Canadá. En Canadá, investigadores de la Universidad de Ontario han propuesto y analizado un sistema integrado para generación de electricidad, calefacción, refrigeración y producción de agua caliente. El sistema consta de un sistema de refrigeración de cuádruple efecto y un ciclo binario de múltiple etapa con isobutano como fluido de trabajo, que en conjunto proporcionan electricidad, agua caliente, calefacción y enfriamiento a un edificio. Para el sistema propuesto, se lleva a cabo una evaluación del desempeño termodinámico, evaluando las eficiencias energéticas y exergéticas e identificando los parámetros de operación para diversas temperaturas del fluido geotérmico. Finalmente, se hace una evaluación general del sistema para aplicaciones prácticas, [45]. El sistema integrado consiste de un sistema de refrigeración y la planta de ciclo binario que suministran energía a un edificio. En este sistema el agua geotérmica se pasa primero a través del sistema de refrigeración. El efecto de enfriamiento y calentamiento producido se suministran al edificio. Posteriormente, el fluido geotérmico pasa a la planta ciclo binario para producir energía eléctrica. Una parte de la energía producida por la planta binaria se suministra al propio sistema de refrigeración y la energía restante se suministra al edificio. El agua geotérmica que sale de la planta ciclo binario se suministra al edificio para ser usada como agua caliente sanitaria.

México. En el caso Mexicano poco se han utilizado los recursos geotérmicos de media y baja temperatura, utilizándose únicamente con fines recreativos en balnearios termales. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha sido la encargada del desarrollo de los proyectos la generación eléctrica. La mayoría de ellos con éxito, utilizando pozos geotérmicos con temperaturas superiores a los 200 °C. La literatura reporta que en la comunidad de Maguarichi (Chihuahua), se utilizó recurso geotérmico de media entalpía para implementar un proyecto para generación eléctrica utilizando una planta de ciclo binario Ormat de 300 kW. Se reportó que el pozo geotérmico utilizado suministraba un flujo másico de 35 ton/h y una temperatura de 98 °C a una profundidad de 300 metros. La planta dejó de operar al llegar la red eléctrica nacional a la comunidad y, posteriormente, fue donada a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), [46]. Para continuar utilizando la energía geotérmica en esta comunidad, se ha considerado el uso en cascada.

Estados Unidos de América. El Instituto de Tecnología de Oregón documenta una aplicación del uso en cascada de la energía geotérmica que consiste en el aprovechamiento de la energía por medio de un ciclo binario y uso posterior del calor geotérmico para el criadero de peces [47]. El esquema plantea utilizar el efluente de la planta de ciclo binario con una temperatura de 96.1 °C reduciéndola hasta aproximadamente 24 °C, utilizando un flujo de 3.5 l/s. Para este caso no se reportan otros datos técnicos relevantes.

Otro sistema con generación eléctrica y uso de la energía térmica, se reporta para la zona geotérmica de San Emidio, al norte de Reno, Nevada. La instalación consiste de una central eléctrica en conjunto con una planta para deshidratación de cebolla y ajo. La central fue construida por la compañía Ormat y se puso en operación a mediados de 1988. La planta consta de cuatro unidades de 1.2 MWe, para producir en conjunto 3.6 MWe de potencia neta a una temperatura de diseño de 141 °C (285 °F). La planta de deshidratación utiliza aproximadamente la misma temperatura de agua geotérmica para el proceso de deshidratado. En la actualidad, la capacidad de la planta de deshidratación es 34,019 kg (75,000 libras) de cebollas por día ó 38,555 kg (85,000 libras) de ajo [48].

Otro aprovechamiento con la denominación formal de uso en cascada, se reporta para la región de Klamath Falls, Oregón, [49]. En la región se dispone de 6 pozos geotérmicos con temperaturas desde los 27 °C hasta los 93 °C y profundidades alrededor de los 90 m. El sistema hace un aprovechamiento en cascada para agricultura y acuicultura. El pozo principal se utiliza para la calefacción de invernaderos a 93 °C. Posteriormente, el efluente de agua de invernaderos a temperatura menor, se utiliza para calentar 37 estanques poco profundos de peces tropicales. El flujo a la salida de los estanques se enfría en un gran estanque y finalmente es utilizado para riego.

Una aplicación similar a la encontrada en Oregón, es la que corresponde a Cotton City, Nuevo México. Para esta zona se considera instalar una planta de ciclo Kalina con una potencia neta de 1 MWe, utilizando una mezcla amoníaco-agua como fluido de trabajo. El recurso geotérmico proviene de un pozo con una profundidad de 120 m, con una temperatura entre 115 °C a 120 °C, y un flujo de 63 l/s. Esta planta suministrará energía eléctrica a una instalación para el criadero de peces y el calor residual se utilizará también para mantener la temperatura de dicho criadero. Se estima que el costo del sistema sea de 3,3 millones USD, [50,51].

Entre 2003 y 2005 se construyó el primer Museo de Hielo de los Estados Unidos en Chena (noreste de Fairbanks, Alaska). Para ésta región los recursos geotérmicos con los que dispone son manantiales termales y pozos geotérmicos con una temperatura promedio de 74 °C (165 °F) y 300 m de profundidad en promedio. Para producir y mantener el hielo del museo, se utilizó una máquina de refrigeración por absorción alimentada con recurso geotérmico. La máquina instalada es de medio efecto y tiene una potencia frigorífica de 53 kW (15 TR). Este sistema de absorción utiliza tres niveles de presión con el par de trabajo (amoníaco-agua) alcanzando una temperatura en el evaporador de -29 °C y mantiene el hotel con una temperatura de -4 °C. El agua para enfriamiento de los absorbedores y del condensador se toma de un río cercano con temperatura de 4 °C. Después de su paso por el proceso de generación de frío, el fluido geotérmico es reutilizado aplicando el concepto de cascada para completar los requerimientos de calor de una piscina. Se prevé que posteriormente el fluido geotérmico de ese proceso se destine a la calefacción de invernaderos, [52-54].

Finalmente, la instalación más reciente para el uso geotérmico en forma de cascada se desarrolló en Canby, California. La instalación consiste en una planta de potencia ORC de 50 kW, invernaderos, calefacción de distrito y acuicultura [55,56]. El objetivo de este proyecto es producir energía eléctrica a partir del uso del recurso geotérmico con una temperatura de 96.1 °C (205 °F), además de utilizar la energía residual de la planta de generación eléctrica para implementar la utilización en cascada en varias aplicaciones de uso directo. La Figura 28, muestra el diagrama de flujo del proyecto Canby [57]. Puede apreciarse que el recurso geotérmico ingresa primeramente a la planta de generación eléctrica y el calor disipado en el condensador se puede utilizar para acuicultura. Posteriormente, al abandonar el evaporador del ciclo de potencia, el recurso geotérmico se utiliza primeramente, para la calefacción de distrito y después, para la calefacción de invernaderos. Finalmente, el recurso geotérmico es reinyectado.

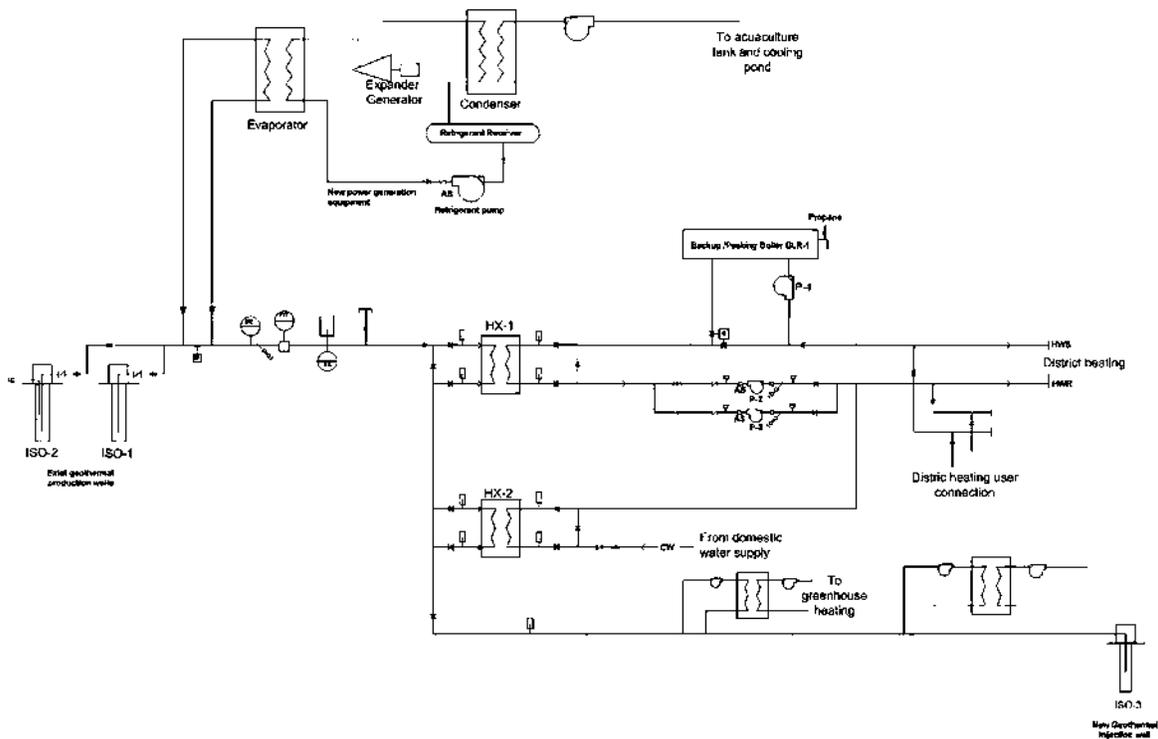


Figura 28. Sistema esquemático del proyecto Canby, California [57].

2.2.3 Asia

El continente Asiático cuenta con una gran cantidad de plantas de potencia operando mediante energía geotérmica. En lo que respecta a múltiples aplicaciones de la energía geotérmica sobresalen los países de China, Irán y Tailandia.

China. Para China se reportan varias publicaciones donde se considera el uso en cascada como una forma de utilizar de manera eficaz, racional y sostenible los recursos geotérmicos del país. Se analizan diferentes perspectivas de la utilización integral en cascada del agua geotérmica aplicando tecnologías tales como: calefacción radiante, bombas de calor para calefacción, intercambiadores de calor de placas, etc. Se aplican diversas técnicas para maximizar el uso de la energía geotérmica y disminuir el agotamiento de los yacimientos geotérmicos. Los estudios demuestran el potencial del uso en cascada,

además de obtener beneficios sociales, económicos y ambientales significativos. Las regiones reportadas en estos trabajos son Tianjin, Qinhuangdao y Hengshui [58-62].

Otro tipo de uso en cascada corresponde a la generación eléctrica con acoplamiento a procesos en campos petroleros. En [63], se hace la descripción de un sistema de producción de potencia de baja temperatura mediante un ORC que interactúa con el suministro de calor a dos procesos petroleros. Se analiza la viabilidad de reemplazar las calderas de gasóleo y suministrar la energía térmica por medio del calor geotérmico. El recurso geotérmico se utiliza en primer lugar para generar electricidad y segundo lugar para suministro de calor al subsistema GHT (Gathering Heat Tracing) y posteriormente, al subsistema de recuperación de petróleo. El estudio destaca que la propuesta de uso en cascada es económicamente rentable y es también técnicamente viable para su implementación en los procesos de los campos petroleros.

En el mismo sentido, se presenta la evaluación del desempeño un Ciclo de Kalina (KC) activado mediante energía geotérmica y acoplado a procesos en campos petroleros [64]. En esta investigación se establece un modelo matemático del ciclo de Kalina y se optimiza mediante el análisis de las eficiencias térmicas y exergéticas. Se analiza la recuperación de calor de baja temperatura y se evalúa el desempeño económico del sistema de utilización en cascada. Los resultados que se obtienen demuestran que este uso en cascada con generación de electricidad y recuperación de petróleo crudo es una forma de ampliar los beneficios económicos de la instalación. La Figura 29 muestra el sistema en cascada de dos niveles de temperatura. En el primer nivel, el ciclo Kalina es activado por energía geotérmica directamente del pozo geotérmico, y en el segundo nivel de temperatura se encuentra el subsistema de producción de petróleo crudo. Para aumentar la potencia del ciclo KC, se incorpora un enfriador por absorción para disminuir la temperatura del agua de enfriamiento.

Con el propósito de determinar el desempeño del sistema en cascada basado en los ciclos KC y ORC acoplados a procesos en campos petroleros, se llevó a cabo un estudio comparativo [65]. En el estudio se evalúa el rendimiento del ciclo ORC y del ciclo de Kalina de manera numérica para diferentes fluidos de trabajo. Se muestra que el rendimiento del subsistema ORC usando R236fa es mejor que otros fluidos de trabajo. Por otro lado, el rendimiento del subsistema KC con una fracción de masa de amoníaco de 0.8 es la alternativa más apropiada. Sin embargo, para las condiciones estudiadas la potencia del subsistema KC es mayor que para el ciclo ORC. En la investigación se utilizan recursos geotérmicos de media entalpía con temperatura de 140 °C. En general, para las dos opciones, la utilización de agua geotérmica en campos petroleros no sólo puede generar electricidad y energía térmica, sino también ahorrar grandes cantidades de petróleo para aumentar los beneficios anuales. La Figura 30, muestra el diagrama esquemático con el ciclo ORC, donde el agua geotérmica se envía al subsistema de producción de petróleo después de la generación de electricidad. En este caso el subsistema CAT (Collection and Transport) para recolección y transporte de petróleo que consume una gran cantidad de energía térmica, es proporcionado por una caldera convencional.

Por su parte, el diagrama esquemático de la utilización cascada basado en el ciclo KC se muestra en la Figura 29. En este caso, el fluido geotérmico ingresa al evaporador del KC para activarlo, posteriormente pasa al subsistema CAT y después, al tanque de sedimentación del subsistema de producción de petróleo. Finalmente el fluido geotérmico es reinyectado. El sistema también cuenta con el enfriador de absorción activado con energía geotérmica.

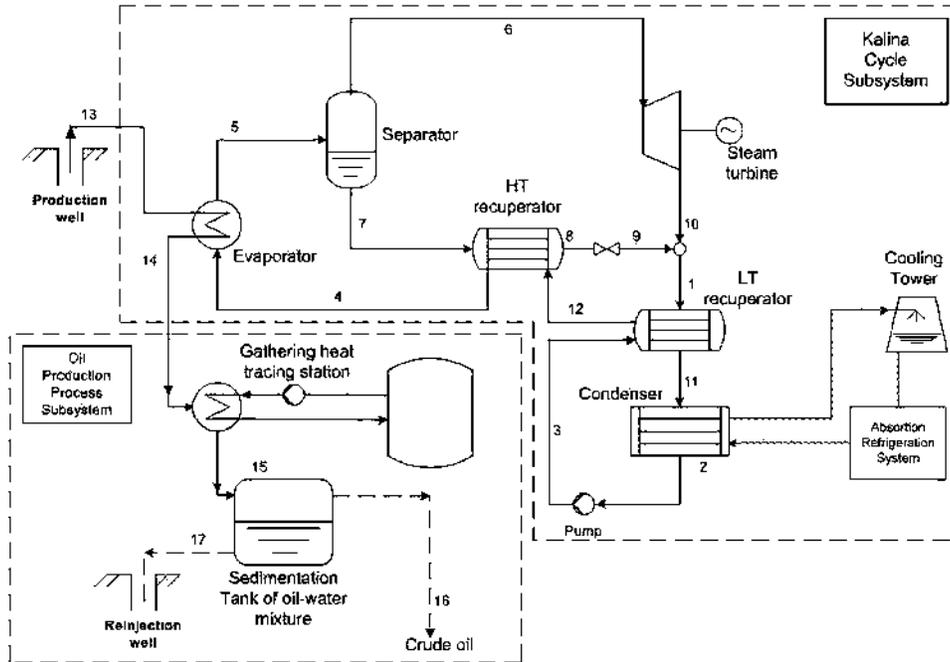


Figura 29. Sistema en cascada con ciclo Kalina y producción de petróleo crudo, [64].

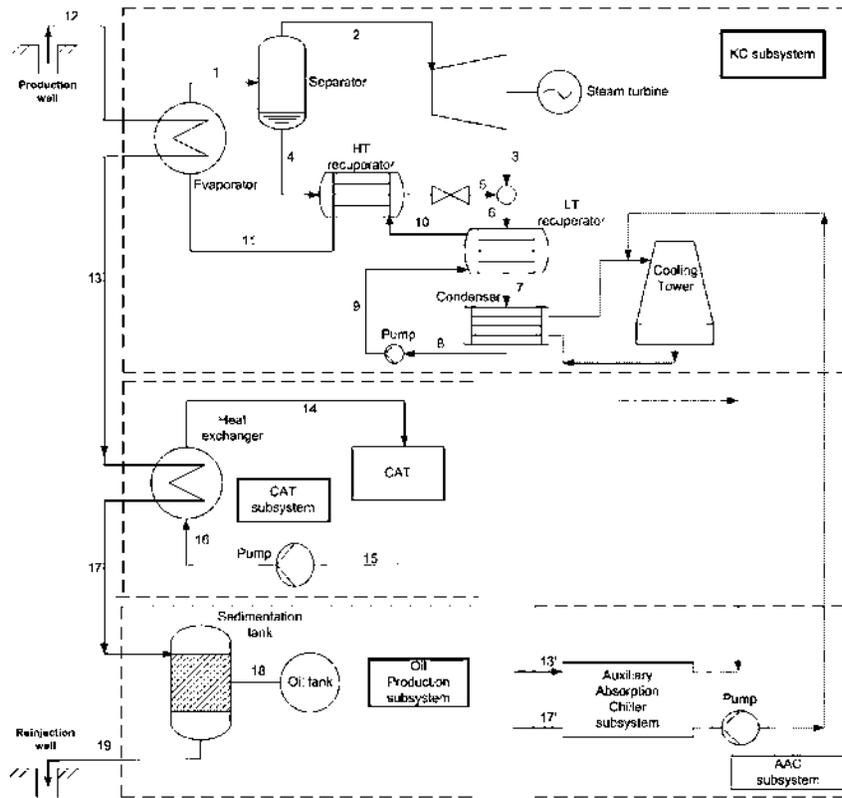


Figura 30. Diagrama del sistema en cascada basado en KC, [65].

Finalmente, en lo que corresponde a China, investigadores de la Shanghai Jiao Tong University muestran una pequeña planta experimental en cascada geotérmica, con un sistema ORC acoplado con un enfriador de adsorción de dos etapas [66]. En el primer nivel del sistema se tiene un ORC que opera mediante energía geotérmica y para el segundo nivel se tiene el ciclo de adsorción. El diagrama de la planta se muestra en la Figura 31, e incluye los dos subsistemas. El ciclo ORC opera con R245fa como fluido de trabajo y el ciclo de adsorción opera con una mezcla de $\text{CaCl}_2 / \text{BaCl}_2$ en dos etapas. Los ciclos se conectan en cascada por el circuito de fluido de calentamiento que fluye hacia el ORC en primer lugar, y luego, hacia las dos etapas del enfriador de adsorción. Para el proceso, el calor geotérmico se utiliza dos veces de manera secuencial, incrementando la eficiencia de utilización del calor geotérmico. De esta manera se consigue la generación de electricidad y la producción de frío, en un proceso en cascada geotérmica. La temperatura del recurso geotérmico es de $98\text{ }^\circ\text{C}$ (fuente de calor), temperatura de $30\text{ }^\circ\text{C}$ para enfriamiento en condensador, y temperatura de $-15\text{ }^\circ\text{C}$ en el evaporador en el ciclo de adsorción. Los resultados experimentales muestran que es posible operar la planta con energía térmica con temperatura en el rango de $78\text{ }^\circ\text{C}$ a $98\text{ }^\circ\text{C}$. Rango de temperatura apropiado para recursos geotérmicos de baja entalpía o calor residual de procesos industriales.

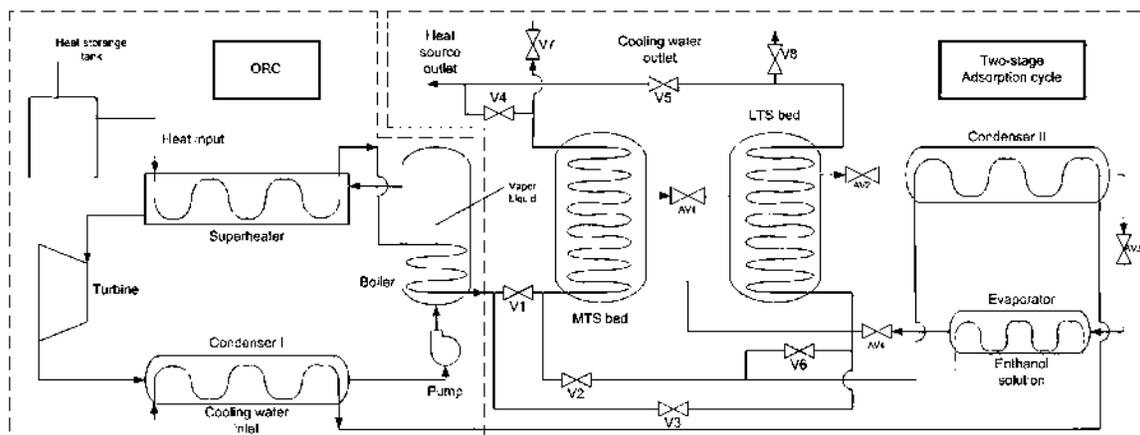


Figura 31. Producción en cascada de electricidad y frío, [66].

Irán. En Irán, en la región geotérmica de Sabalan se encuentra un pozo geotérmico artesano nombrado Gheyнарjeh que registra una temperatura de $83\text{ }^\circ\text{C}$ y un flujo de 7 l/s . Para usar este recurso geotérmico, se estudian dos alternativas. La primera alternativa consiste en cubrir las necesidades de una piscina y, la segunda plantea el uso geotérmico para un sistema de calefacción de distrito. El análisis de las alternativas planteadas se lleva a cabo con la consideración de ser operados posteriormente con una planta geotérmica bajo el esquema de uso en cascada. En el trabajo sólo se menciona que el recurso geotérmico del pozo Gheyнарjeh es apto para utilizar en ambas alternativas y no se proporcionan más datos del uso posterior en forma de cascada, [67].

Tailandia. En Tailandia la EGAT (Electricity Generating Authority of Thailand) ha instalado una planta de ciclo binario de 300 kWe y ha considerado utilizar el calor residual para un proceso de deshidratación de chile y ajo. La temperatura del recurso geotérmico que entra al ciclo es $116\text{ }^\circ\text{C}$ y el agua geotérmica abandona el ciclo binario a una temperatura de $80\text{ }^\circ\text{C}$ para circular a través de intercambiadores de calor instalados en cabinas de deshidratación, [68,69]. La potencia neta de la planta varía con la temporada de 150 a 250 kWe (175 kWe en promedio) produciendo 1.2 GWh/año . En este proyecto se

consideran otros usos de la energía geotérmica para secado de productos agrícolas y para un Spa. Para este caso, los resultados económicos muestran que este sistema es rentable [70,71].

2.2.4 Europa

Europa es sin duda el continente con mayores aplicaciones geotérmicas en el mundo, por lo menos en cuanto al uso directo se refiere [72]. Entre los países en los que se ha propuesto múltiples aplicaciones de la energía geotérmica Islandia es el país que cuenta con la mayor diversidad de aplicaciones, destacando la generación eléctrica y sistema de calefacción de distrito que abastecen a las ciudades de Reykjavik y Húsavik.

Albania. La temperatura media del recurso geotérmico de los manantiales geotérmicos Albaneses es de 60 °C, se trata de manantiales artesanos con un flujo medio de 10 l/s. Se ha identificado que estos recursos son apropiados para clínicas Spa, suministro de agua caliente sanitaria, calefacción para hoteles y centros turísticos. Además pueden considerarse invernaderos para cultivo de flores y vegetales, así como instalaciones de acuicultura. Esto en conjunto representa una oportunidad para la construcción de complejos turísticos y de servicios operando con uso en cascada geotérmica, [73-75].

Basado en lo anterior, se ha presentado un concepto innovador con uso híbrido de energía solar y energía geotérmica en cascada, donde se propone lo que se ha denominado multicentro con diversos servicios como Spa, gimnasio y piscinas termales, incluyendo invernaderos y acuicultura. Como recurso geotérmico se ha considerado el pozo geotérmico Kozani-8 que registra una temperatura del orden de 65.5 °C y un flujo volumétrico de 10 l/s, [76–80]. La calefacción del centro se suministra mediante la utilización directa de la energía geotérmica (a través de la instalación de intercambiadores de calor), mientras que para el enfriamiento se contempla una bomba de calor geotérmica. El techo del multicentro es cubierto con paneles solares, cuya combinación con energía geotérmica puede proporcionar la energía térmica para una planta de generación de electricidad y posteriormente cubrir las necesidades de agua caliente sanitaria. Esta electricidad servirá para abastecer el sistema de iluminación del centro bajo el concepto de energía verde.

El estudio presenta el análisis económico, con base en los cálculos de Valor Actual Neto (VAN) con una inversión estimada en alrededor de 5.5 millones de Euros. A pesar de que la inversión es demasiado alta, los resultados del estudio económico indican que es factible. Se menciona también que el proyecto puede mejorar de manera importante la calidad de vida de la comunidad.

Austria. En la ciudad de Altheim, en 1989 fue perforado un pozo para abastecer un sistema de calefacción de distrito. El flujo del pozo fue de 46 l/s con una temperatura de 104 °C, equivalentes a 10 MWt para calefacción urbana. El sistema de calefacción tiene la capacidad de suministrar calor aproximadamente al 40% de los habitantes de Altheim. El 80% de la energía térmica se utiliza para hogares, y el resto se utiliza para la calefacción de una escuela y una piscina. Además de la energía térmica, el fluido geotérmico también se destina para la generación de electricidad mediante un ciclo ORC con potencia nominal de 1 MWe. Una vez que el fluido geotérmico disipa su calor en los intercambiadores de calor es reinyectado a 65 °C. El sistema de calefacción urbana, opera cerca de 1,200 horas/año con un costo alrededor de los 0.05 USD/kWh (€ 0.04/kWh) en base a una reducción de temperatura en el agua de 30 °C [81,82].

La zona geotérmica de Geiberg también ha sido considerada para implementar un sistema que utiliza la energía en forma de cascada con el que se produce, calefacción de distrito, Spa en hoteles, calefacción de invernaderos y energía térmica para balnearios. El sistema es activado mediante un recurso geotérmico a 100 °C y está compuesto por cuatro niveles térmicos de temperatura. El fluido geotérmico en el primer nivel se destina para suministro de calor a procesos lácteos y calefacción de distrito a una temperatura de 95 °C, operando con una diferencia de temperatura de 30 °C. El segundo nivel térmico se destina para la calefacción de un centro Spa y calefacción de hoteles, a una temperatura de 75 °C. El tercer nivel térmico se destina para la calefacción de invernaderos a una temperatura del orden de los 50 °C. Finalmente, una fracción del fluido se utiliza para uso en balnearios y el resto del fluido geotérmico es reinyectado, [82]. La Figura 32, muestra el esquema para este sistema.

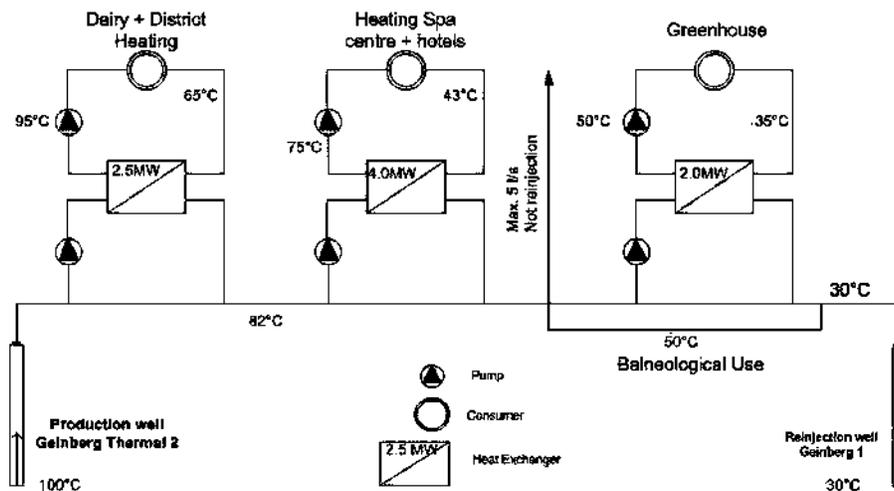


Figura 32. Esquema del funcionamiento de Geiberg, adaptada de [82].

Alemania. En Neustadt-Glewe en el norte de Alemania, se encuentra una planta geotérmica que data de 1995, para suministrar energía para calefacción urbana. La producción total del sistema es de 11 MWt de los cuales 6 MWt se producen mediante energía geotérmica y el resto es proporcionado mediante una caldera de gas natural. Además de producir energía térmica útil la planta también produce electricidad mediante un ciclo ORC de 210 kWe, con n-Perfluoropentano (C₅F₁₂) como fluido de trabajo. Para la generación de ambos productos se cuenta con un fluido geotérmico con una temperatura de 110 °C a razón de 30.6 l/s. Debido a las condiciones variables de temperatura en verano e invierno la planta de energía opera bajo condiciones variables de flujo a temperatura constante. Después de su uso, el fluido geotérmico es reinyectado a una temperatura del orden de los 50 °C. El costo total del proyecto de calefacción urbana fue 12.3 millones de USD y 1.24 millones de USD para la planta de generación eléctrica [83].

Grecia. En el año 2002, se propone un proyecto por la Community Research and Development Information Service (CORDIS) para uso en cascada de la energía, en el campo geotérmico de Xanthi. Se propone el uso de la energía geotérmica para la pasteurización de leche, en paralelo con la producción de frío por medio de máquinas de absorción para enfriamiento de distrito. Posterior al proceso de pasteurización, la energía geotérmica se destinará para calefacción de invernaderos y almacenamiento de frío. Los pozos geotérmicos se encuentran aproximadamente a 2,500 km de distancia de las aplicaciones. El fluido geotérmico cede su calor a los diferentes usos y después es

De manera formal, a partir del sistema ampliado de calefacción y generación eléctrica, se propone un esquema de planta integrada para usos múltiples de la energía geotérmica utilizando los recursos geotérmicos de media y baja entalpía, [88-90]. Para la producción de electricidad se consideró el uso de ciclo binario y ciclo ORC, además de lo que en ese momento era la tecnología de punta, el llamado ciclo Kalina. Finalmente, se decidió instalar el ciclo Kalina con una potencia nominal de 2 MW para operar con un recurso geotérmico de 124 °C. Sin embargo, la planta genera 1.7 MW debido a que la temperatura real el recurso es de 121 °C. En este esquema de usos múltiples está considerado el suministro de calor para procesos industriales, granjas e invernaderos, una granja piscícola, fusión de hielo y uso recreativo en una laguna termal. La Figura 34, muestra los usos y niveles de temperatura. El costo total del proyecto asciende a unos 12 millones de Euros, de los cuales 8 millones se destinaron a la renovación de la red de calefacción urbana y 4 millones a la planta de generación eléctrica. Dentro de las mejoras en progreso se tiene el secado de madera, producción de glucosamina y criadero de tilapias.

En Islandia, otra aplicación con producción conjunta de electricidad y energía térmica se identifica en la planta Svartsengi, que suministra agua caliente a un sistema de calefacción urbana en la península de Reykjanes. Provee electricidad a Hafnarfjörður y otras comunidades. La capacidad de generación total de la planta es 46.4 MWe y 200 MWt (2,700 TJ/año) en forma de agua caliente para la calefacción urbana. La planta está ubicada cerca de la ciudad de Grindavík al suroeste de Reykjavík. El sistema cuenta con 12 pozos de producción y uno de reinyección. El fluido del reservorio es una salmuera a 240 °C. La mayor parte de las aguas residuales desemboca en el campo de lava adyacente y la famosa zona de baño "Laguna Azul" [71,91].

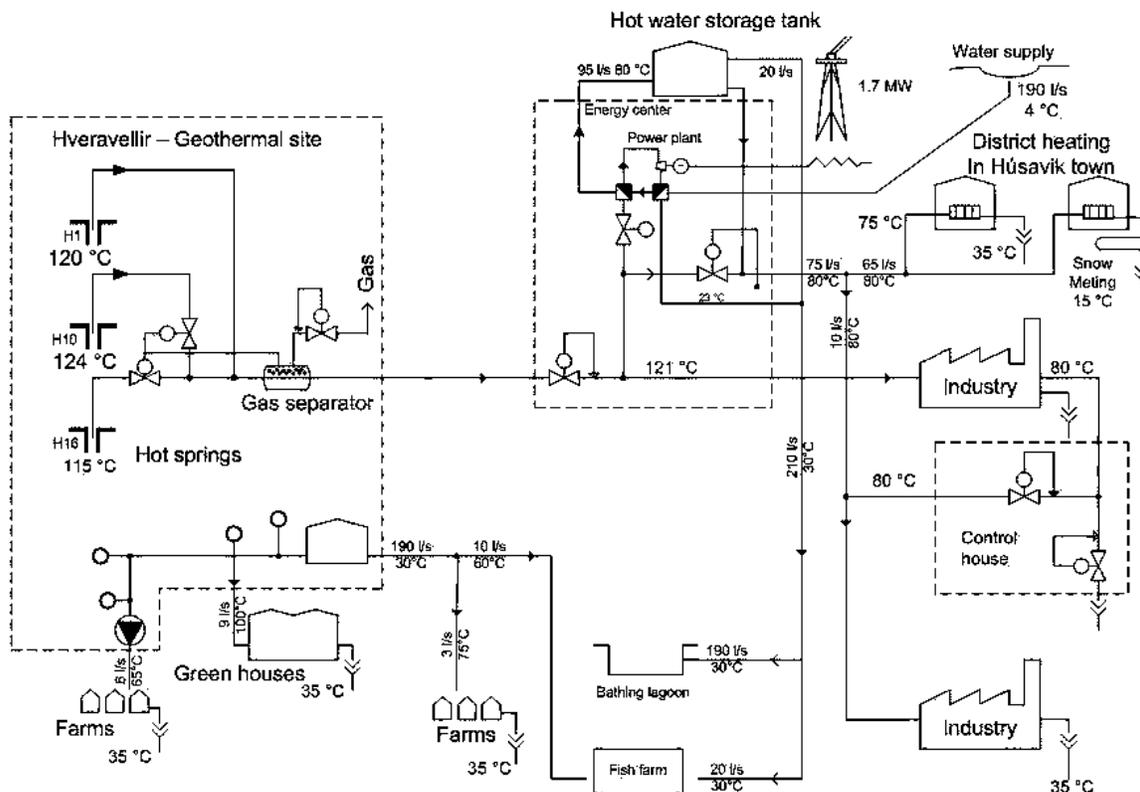


Figura 34. Húsavík, diagrama del uso múltiple de la energía geotérmica.

Macedonia. Para el pueblo de Kocani, localizado en la parte noreste de Macedonia, se ha planteado el uso del agua caliente geotérmica principalmente para calefacción de distrito e invernaderos, [94]. Para esta localidad se propuso potenciar el uso del recurso geotérmico a partir de la mejora al sistema geotérmico actual denominado sistema GEOTERMA. Este sistema reportaba problemas ambientales debido al vertido del agua termal al río Kokanska, que provocaba el incremento de la temperatura del agua del río, afectando en consecuencia, el ciclo natural del agua. Entre las alternativas de solución se propuso el uso en cascada del recurso geotérmico para reducir la temperatura de descarga y tener un mejor aprovechamiento de la energía. Para el sistema se tiene una temperatura a la salida de los pozos geotérmicos entre 73 °C y 78 °C y un flujo máximo de 450 l/s. Entre los beneficios del sistema en cascada se remarca la eficiencia del sistema, la reducción del impacto ambiental y una mejora en la economía de la comunidad [94].

Polonia. En el Laboratorio Geotérmico de Pas Meeri, ubicado en la región de Podhale, se documenta un proyecto piloto donde se implementa el uso en cascada de la energía geotérmica. El proyecto consiste en la implementación de un sistema de recuperación de calor en cascada para el criadero de peces y cultivo de vegetales. La Figura 49, muestra el esquema de este proyecto piloto [95]. En el sistema se considera una temperatura a la salida del pozo geotérmico entre 80 °C y 90 °C para ingresar a la central de energía geotérmica y proveer de agua caliente para la calefacción de distrito a apartamentos y edificios, así como de agua caliente sanitaria. Después del primer uso térmico, el agua tiene una temperatura entre 45 °C y 65 °C, temperatura suficiente para la crianza de peces y cultivo de vegetales. Finalmente, el agua es reinyectada. El esquema propuesto proporciona datos que validan el aumento en la eficiencia y la rentabilidad de la planta.

Para Polonia se presenta también una patente, donde se describe un método para la utilización de fuentes de calor de baja y media temperatura, [96]. La invención reclamada se caracteriza por su uso para precalentar el fluido de trabajo de una planta que comprende dos ciclos ORC acoplados térmicamente uno con el otro a través de un intercambiador de calor. Su descripción se resume prácticamente en ciclos ORC que pueden interconectarse en forma de cascada a través de intercambiadores de calor. Las posibles interconexiones se pueden realizar en extracciones de la turbina y, por medio del calor rechazado en el condensador del ORC de más elevada temperatura. En este sistema únicamente se genera energía eléctrica en dos niveles térmicos.

Rumania. Investigadores de la Universidad de Oradea, en Rumania, proponen utilizar la energía geotérmica para la producción de electricidad, la pasteurización de leche, el suministro de calor a un conjunto de viviendas y balneología [97]. Para la propuesta del sistema se considera una temperatura de 100 °C del agua geotérmica, con un flujo de 60 l/s y una presión de 4 bares. El agua caliente que proviene del pozo se separa en dos corrientes, una para el proceso de pasteurización de leche y la otra para la generación de electricidad por medio de un ciclo binario. El agua geotérmica que abandona el evaporador del ciclo binario se dirige a invernaderos y posteriormente a piscinas para balneología. La corriente de agua a la salida de las piscinas se une con la descarga del proceso de pasteurización, y finalmente se reinyecta.

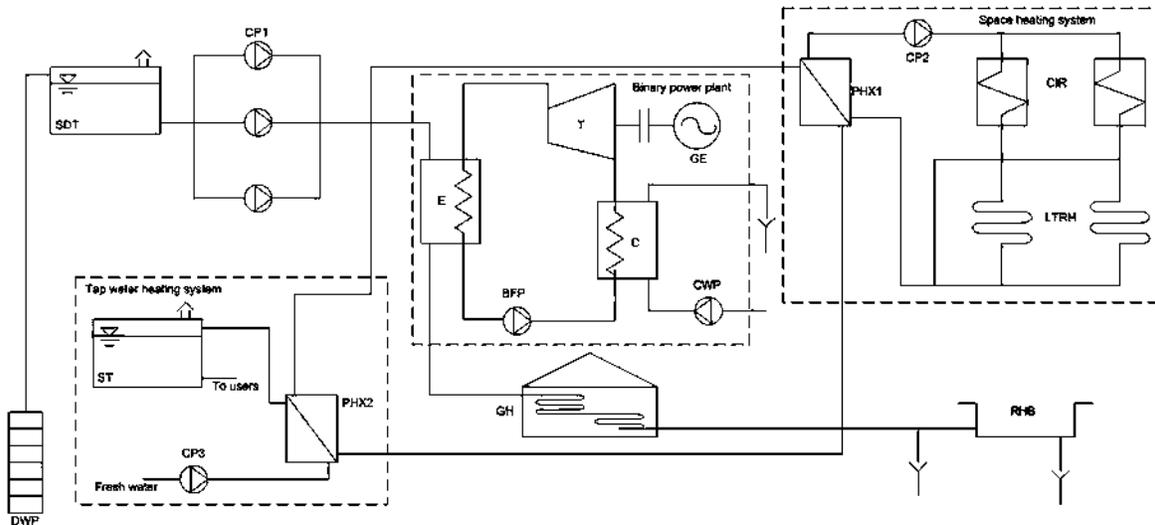


Figura 36. Disposición de los usos en cascada del agua geotérmica en la Universidad de Oradea, tomada de [98].

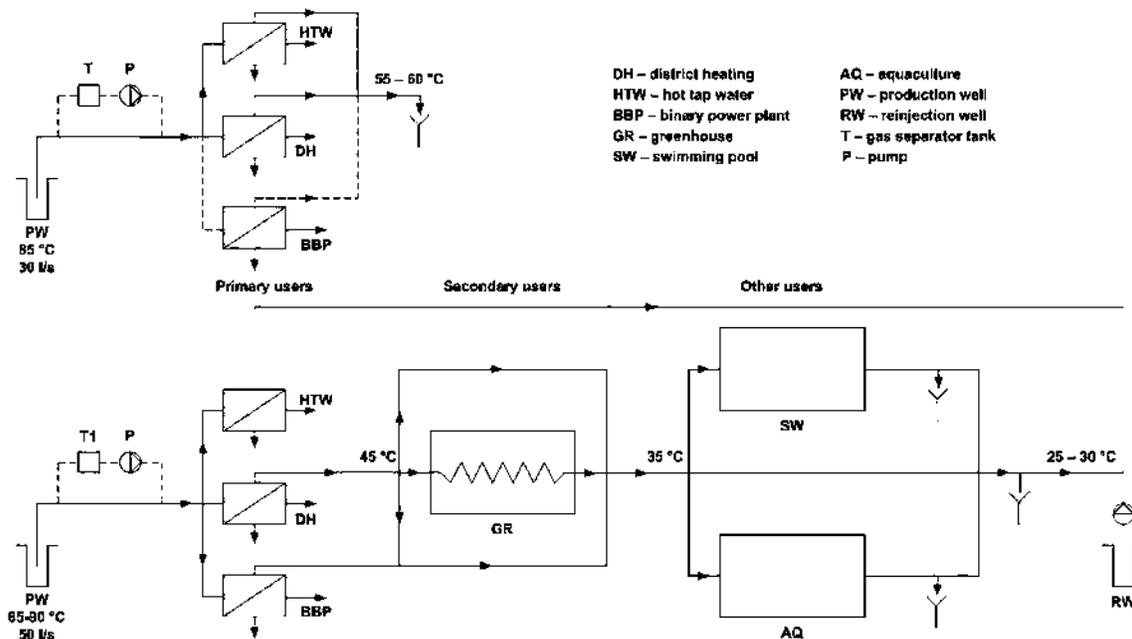


Figura 37. Diagrama de la instalación existente y perspectivas, tomada de [98].

Otro estudio que considera la posibilidad de cubrir las necesidades térmicas del campus universitario de Oradea por medio de agua caliente geotérmica se presenta en [98]. Dentro de dicho campus se encuentra un pozo de 2,991 metros, que fue perforado en 1981 y que reporta actualmente un flujo de agua caliente de 25 l/s y una temperatura de 84 °C. Inicialmente el pozo fue destinado para abastecer de agua caliente sanitaria y calefacción al campus universitario y tres bloques de apartamentos. Para potenciar el uso del recurso geotérmico se propuso incorporar al sistema una planta de ciclo binario con CO₂ como fluido de trabajo, un invernadero y una piscina. La Figura 36 y Figura 37, muestran el arreglo propuesto con uso en cascada de la energía para el campus de la universidad de Oradea. En este

sistema en cascada el agua geotérmica proveniente del pozo se separa para alimentar el ciclo binario y cubrir las necesidades agua caliente sanitaria y calefacción, al mismo nivel de temperatura. Posteriormente, el agua que abandona el evaporador del ciclo binario y que tiene una temperatura entre 45 °C y 50 °C, se dirige al invernadero y en último nivel de temperatura a las piscinas. Finalmente el agua geotérmica es reinyectada. Es importante señalar que debido a la complejidad del sistema se han utilizado controladores lógicos programables (PLC) y un sistema de control y adquisición de datos (SCADA) como herramientas para determinar la mejor estrategia de operación. Los cálculos técnicos del estudio demuestran que la propuesta presenta un ahorro de energía y una reducción de emisiones de CO₂. Un reporte completo con toda la información relacionada con este proyecto se puede encontrar en [99].

Recientemente se ha documentado otro uso en cascada para el distrito de losia en Oradea, [101]. Para este sistema, el recurso energético proviene de tres pozos geotérmicos cuyo flujo total es de 29 l/s con una temperatura promedio de 105 °C. El flujo de uno de los pozos se utilizará para alimentar un ciclo ORC capaz de producir 50 kWe de electricidad, el fluido de trabajo de la unidad es hfc245fa, que no daña la capa de ozono. El flujo a la salida del ciclo ORC se une con el flujo de los otros dos pozos en un cabezal y posteriormente se envía a la planta de servicios térmicos para proporcionar energía en forma calor a la red de calefacción de distrito y otros edificios públicos. En el último nivel de la cascada, se tienen unas piscinas para natación. El sistema cuenta con calderas auxiliares para cubrir principalmente los picos de demanda térmica. Los datos de operación de esta planta muestran que el esquema en cascada ha incrementado el factor de utilización del recurso geotérmico, [101].

En relación a las propuestas en cascada para el Campus Universitario de Oradea, en otro estudio se considera la utilización de bombas de calor para suministrar calefacción por suelo radiante a otros edificios, así como el suministro agua caliente sanitaria. Como último nivel de uso del agua geotérmica se propone utilizar la energía térmica para la fusión de nieve [100]. La Figura 39, muestra el esquema de uso en cascada para esta propuesta.

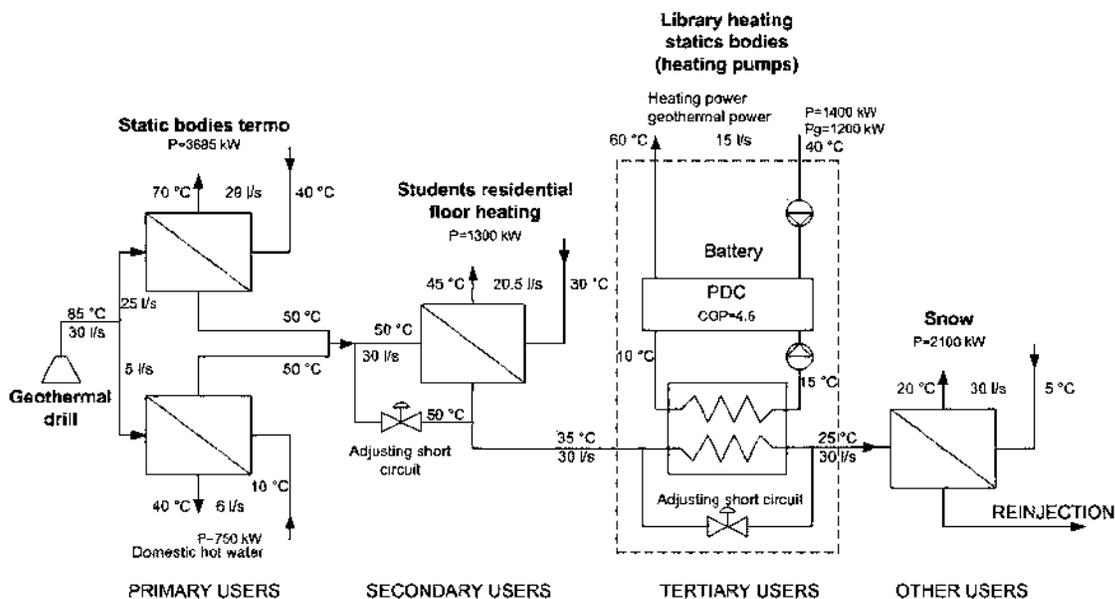


Figura 38. Diagrama de bloques del centro termal de la planta piloto, usando bombas de calor.

Eslovenia. Para este país se reporta el uso en cascada para la ciudad de Lendava. No se presenta mayor información y únicamente se menciona el aprovechamiento de la energía geotérmica en forma de cascada para producir electricidad, calefacción y frío de distrito, acuicultura, calefacción de invernados y Spas [41]. La temperatura del recurso geotérmico disponible para esta región se reporta en 80 °C, [102].

Turquía. En Turquía se ha realizado una investigación sobre el uso integrado de recursos geotérmicos considerando las condiciones de la región geotérmica de Kutahya,-Simav. Esta región cuenta con diez pozos geotérmicos con profundidades entre 169 y 765 metros y con temperaturas desde 84 °C hasta 162 °C, temperaturas aptas para la generación de electricidad, la calefacción y el termalismo. En este sentido, se ha propuesto un complejo de usos múltiples con el fin de utilizar la energía geotérmica de manera más eficiente. Para la generación de electricidad se ha investigado la viabilidad de integrar un ciclo binario, utilizando el fluido geotérmico posteriormente para proveer energía en forma de calor para residencias e invernaderos y un Spa, la Figura 40 muestra el diagrama esquemático del sistema. Para llevar a cabo la investigación se ha utilizado el análisis exergético y el costo de ciclo de vida. Los resultados obtenidos muestran que el uso múltiple de la energía geotérmica es una opción económicamente rentable para las condiciones de la región geotérmica de Simav, [103].

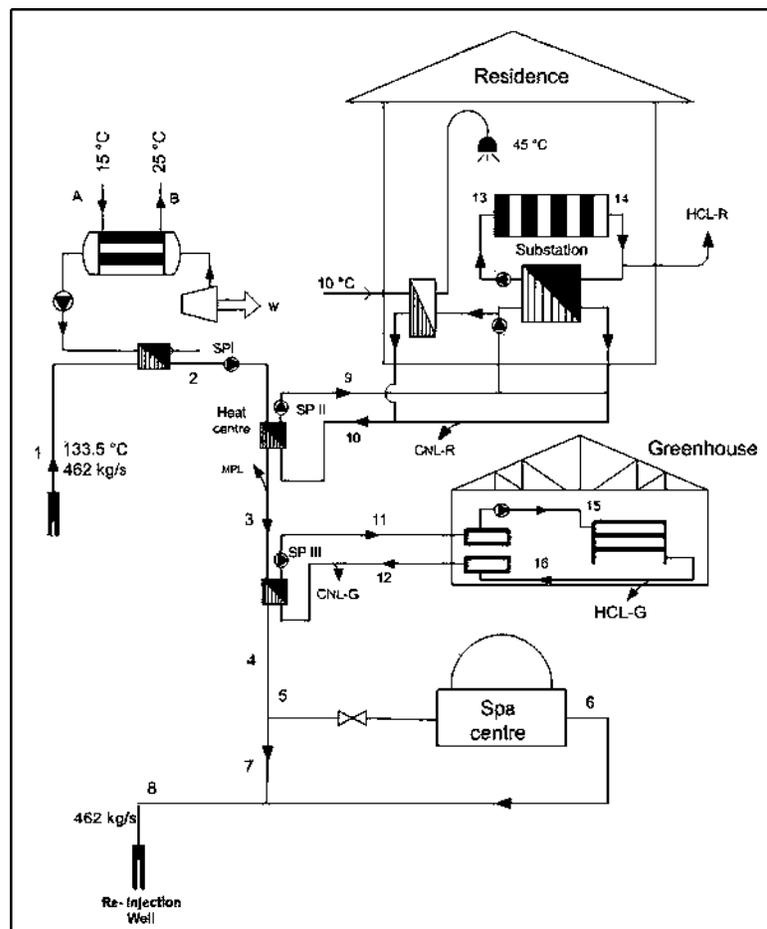


Figura 39. Sistema integrado mediante recurso geotérmico, tomada de [103].

2.2.5 Oceanía

En Oceanía, el país que sobresale en cuestión de aplicación y utilización de la energía geotérmica desde usos directos hasta instalaciones para generación de electricidad es Nueva Zelanda.

Nueva Zelanda. En la zona geotérmica de Kawerau se instaló una planta de ciclo binario marca Ormat de 2.4 MWe y posteriormente se instaló otra planta de 3.5 MWe del mismo fabricante. Estas plantas se operan en conjunto con una planta de proceso de celulosa y papel, aprovechando así el uso en cascada del recurso geotérmico en forma de vapor y posteriormente el uso del calor de forma directa [104]. La temperatura del recurso geotérmico para este complejo es de 270 °C. El vapor geotérmico es explotado para la producción de electricidad y el secado de productos de madera.

2.3 Beneficios potenciales de un sistema en cascada.

Según la revisión de sistemas en cascada y otros documentos, el desarrollo de sistemas en cascada potencialmente aportarán los siguientes beneficios en términos de la organización, conocimiento científico e impacto social:

2.3.1 Ciencia y tecnología

Aportación de conocimiento científico y técnico derivado de la combinación de tecnologías existentes que no se han implementado en el sector comercial del país; especialistas capacitados en el aprovechamiento de energía a partir de un modelo de uso en cascada de la energía geotérmica.

2.3.2 Ampliación de los recursos humanos expertos en geotermia

Quizás el síntoma más importante de la falta de una clara política para la energía se manifiesta en la manera en la cual se maneja la regulación de energía geotérmica por las instituciones gubernamentales. Si bien la secretaria de Energía es técnicamente el departamento para todos los recursos energéticos, la responsabilidad de los proyectos de energía geotérmica, la información y la evaluación están repartidas a través de pocas instituciones. Además, estas instituciones cuentan con muy pocas personas dedicadas específicamente a la gestión y avance del desarrollo geotérmico. Un número mayor de expertos en el tema en diferentes entidades podrá ayudar a elevar el perfil de la energía geotérmica dentro de las instituciones mexicanas, garantizando que sea incluida explícitamente y en mayor medida en la planificación futura de recursos. Ello podrá, también, ayudar a fortalecer la coordinación y efectividad del modo en que los recursos geotérmicos son gestionados.

El gobierno y la industria pueden asegurar la formación de las nuevas generaciones de profesionales geotérmicos al fomentar la colaboración con las instituciones académicas especializadas para promover la investigación y el desarrollo continuo.

2.3.3 Beneficios sociales

Incremento en la competitividad nacional en el sector energético, al contar con un modelo que permita un aprovechamiento más eficiente de los recursos geotérmicos, asociado a menores costos de producción. Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, coadyuvando a la atenuación de efectos de cambio climático.

2.3.4 Costos de las fuentes de energía geotérmica.

Hacer el cambio a las energías renovables puede tener ventajas significativas de costos sobre los combustibles fósiles. En general, las comparaciones de costos entre diversos tipos de generación de energía pueden ser difíciles debido a que diferentes factores influyen en el precio detallado de la electricidad, incluyendo los costos de producción, transmisión y distribución, subsidios, impuestos y regulaciones. Sin embargo, un método, el Costo Nivelado de Energía (LCOE), permite la comparación entre diferentes tecnologías al proporcionar un costo por kWh de la energía durante el ciclo de vida de una planta de energía. El LCOE estándar toma en cuenta factores relacionados directamente con la producción de energía tales como el costo de equipo, combustible y mano de obra, así como estimaciones de eficiencia de plantas. Al hacer una comparación de costos nivelados respecto a las fuentes de energía, es posible estimar los beneficios de costos de las fuentes de energía renovables con respecto a los combustibles fósiles. Sin embargo, las estimaciones estándar de LCOE aún no incluyen el verdadero costo de la energía debido a externalidades relacionadas con la generación de energía, así como a las distorsiones de mercado causadas por el fuerte uso del subsidio. Al extender el análisis estándar de LCOE para tomar en cuenta estas externalidades se puede ayudar a lidiar con estos factores faltantes. Considerar esto es una importante herramienta para analizar los verdaderos costos que tiene para la sociedad la energía basada en combustibles fósiles y para demostrar la verdadera diferencia de costos entre producción de electricidad basada en energía renovable y producción de electricidad basada en energía no renovable.

Una evaluación completa de LCOE para la región que incluya costos de salud, ambientales y de cambio climático fortalecerá la justificación para limitar la generación con base en combustibles fósiles y ayudar a los planificadores de energía a determinar la mejor mezcla de fuentes de energía geotérmica para la región. Las evaluaciones de las estructuras económicas y los mercados laborales del país en su relación con la energía geotérmica también son esenciales para determinar la cadena completa de suministros y las oportunidades de empleo para el desarrollo de la tecnología renovable en la región, así como sectores prioritarios para esfuerzos de creación de capacidad.

Otra de las principales ventajas de la energía geotérmica es que ofrece un flujo constante de producción de energía a lo largo del año, porque no depende de variaciones estacionales como lluvias, caudales de ríos, viento, sol, etc., como es el caso de otras fuentes de energías renovables, lo cual es muy importante desde el punto de vista de la seguridad del suministro eléctrico; por lo que se la puede considerar como una energía sostenible. En resumen, se trata de una energía autóctona, limpia, segura, de producción ininterrumpida y que utiliza un espacio reducido de terreno, permitiendo el aporte de electricidad a comunidades situadas en sitios remotos e inaccesibles.

En términos de sustitución, se estima que la energía almacenada en 1 km³ de roca caliente a 250 °C equivale a 40 millones de barriles de petróleo. Desde el punto de vista de los usos térmicos, tradicionalmente el sector residencial y de servicios ha consumido para estos fines gasóleo, electricidad, gas natural o gases licuados derivados del petróleo, todas ellas energías no renovables, caras y de alta dependencia del exterior, que conviene ahorrar y sustituir por otras energías alternativas. El bajo nivel térmico de la demanda permite utilizar la energía geotérmica de baja temperatura, ya sea de manera directa o a través de bombas de calor que permiten incrementar el potencial energético de los pozos e incluso extraer calor de yacimientos de muy baja temperatura, que no serán explotables con métodos convencionales. Se tratará de una tecnología eficiente para calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria con unos importantes ahorros energéticos.

2.3.5 Cambio climático y beneficios para la salud humana

La geotermia está considerada como una energía renovable, pues constituye una fuente inagotable de recursos energéticos. La palabra geotermia viene de las raíces latina "geo" que significa tierra y "termia" que significa calor, por lo que literalmente la energía geotérmica es el calor de la tierra, y este recurso geotérmico es prácticamente ilimitado. Por su carácter autóctono, el aprovechamiento de los recursos geotérmicos implicará la reducción del grado de dependencia del sector energético exterior, la reducción del consumo de fuentes de energía fósiles y el refuerzo de la seguridad del suministro. Si se examina el ciclo de vida completo de la energía geotérmica, los impactos medioambientales son destacadamente menores que los existentes en las centrales térmicas de combustibles fósiles y nucleares, incluso menores en comparación con otras fuentes de energías renovables. Esto es fundamentalmente porque como la fuente de energía geotérmica está en el interior de la Tierra, los equipos de generación eléctrica son relativamente compactos, haciendo que la instalación completa sea más pequeña y, por tanto, el área de terreno requerido por las plantas geotérmicas es mucho menor que el que necesita otro tipo de plantas

Una de las fuerzas motrices que respaldan el uso de energía geotérmica es la mitigación del cambio climático a través de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, las fuentes de energía geotérmica pueden contribuir a otros aspectos de desarrollo sostenible tales como reducir los efectos negativos de los combustibles fósiles sobre la contaminación local del aire y el ambiente, aumentar el acceso a formas más modernas de energía y fomentar la seguridad energética.

La estrategia busca aumentar las fuentes de energía renovable y reducir la participación de la generación de energía basada en combustibles fósiles. Además de reducir las emisiones que alteran el clima, las fuentes de energía renovable ofrecen beneficios en las áreas de salud, contaminación del aire y ambiente. Las fuentes de energía renovables que no son de combustión tienen el potencial de reducir significativamente la contaminación local del aire reduciendo los impactos sobre la salud relacionados con la generación de energía con base en combustible fósil. La común quema de leña y otras fuentes tradicionales de biomasa tiene como resultado impactos sobre la salud a causa de la materia particulada, el monóxido de carbono y otros contaminantes. En los niños, la exposición a largo plazo a estos contaminantes puede aumentar el riesgo de desarrollar infecciones respiratorias agudas y es una de las principales causas de mortalidad.

En resumen la energía geotérmica es un recurso limpio y puede tener menos riesgos ambientales y sociales. Las plantas geotérmicas producen tan solo una sexta parte del dióxido de carbono emitido por un yacimiento de gas natural relativamente "limpio". Asimismo, produce poco o nada de óxido nitroso o gases con contenido de sulfuro.

2.3.6 Creación de empleos en el país

Según la Geothermal Energy Association (GEA) de EE UU, los empleos generados por la energía geotérmica son generalmente estables, de larga duración, muy diversificados y de alta calidad. Además, el avance de la energía geotérmica contribuirá al desarrollo regional, ya que en la mayoría de los casos los recursos geotérmicos tienden a estar localizados en áreas rurales con pocas oportunidades de empleo. Como la energía geotérmica debe ser explotada donde el recurso está localizado. La mano de obra requerida para implementar medidas de eficiencia energética, agregar una significativa capacidad de energía renovable y mejorar la red eléctrica creará nuevas oportunidades de trabajo. La creación de puestos de trabajo incluye empleos directos en las actividades principales del

sector de energía renovable, empleos indirectos en sectores que abastecen la industria de energía renovable y empleos inducidos creados cuando la riqueza generada por la industria de energía renovable se gasta en otros sectores de la economía. Los empleos directos de energía renovable por lo general se dividen en dos categorías: empleos de construcción, instalación y manufactura (CIM) y empleos de operación y mantenimiento (O&M). Los empleos de construcción, instalación y manufactura por lo general se concentran en los primeros años del establecimiento de una planta de energía renovable mientras que la mayoría de empleos de operación y mantenimiento existen durante toda la vida de la instalación. En general, las plantas de energía renovable requieren más mano de obra que las plantas de energía alimentadas con petróleo y esto es positivo en términos de creación de puestos de trabajo. El gasto de recursos en mano de obra en lugar de importaciones de combustibles fósiles de otros países genera beneficios para el país resultantes de la inversión en energía.

Aunque algunas de las compañías extranjeras que instalan energía renovable vienen con sus propios empleados, muchos de los empleos iniciales de energía geotérmica ocurrirán en instalación y en operación y mantenimiento, ya que estos puestos se ubican en el país. Hasta que haya una cadena de valor completa para diversas tecnologías en la región, la mayoría de empleos indirectos y de manufactura se concentrará en los países que fabrican el equipo y los materiales para energías renovables. Por tanto, es crítico seguir construyendo capacidad regional en todas las áreas de energía renovable.

2.3.7 Acceso a la energía

Aunque la electrificación se ha expandido significativamente en el país en las últimas dos décadas, personas todavía tienen un acceso limitado a esta necesidad crítica socioeconómica. Las políticas orientadas únicamente a la producción y distribución centralizada de electricidad son insuficientes para satisfacer las necesidades de los pueblos y las comunidades marginadas.

2.3.8 Figuras de propiedad intelectual

El desarrollo de proyectos contará con el desarrollo de metodologías, integración de procesos y tecnologías con potencial de ser patentados y comercializados posteriormente.

2.4 Conclusiones

De la revisión de aplicaciones, es posible mostrar que el concepto del uso en cascada es una forma efectiva de explotar en una manera sustentable el alto potencial de los recursos geotérmicos clasificados de mediana y baja entalpia. Las barreras que limitaron la utilización de estos recursos geotérmicos han limitado a la utilización de estas fuentes de energía, los recursos han sido reducidos gradualmente debido al desarrollo tecnológico reciente de ciclos de potencia de baja temperatura, tales como ciclos binarios, ciclos Rankine orgánicos y ciclos Kalina. Estas tecnologías están disponibles en la actualidad comercialmente para trabajar de manera apropiada con temperaturas típicamente en el rango de 80-120 °C que coincide perfectamente con el rango de temperatura de los recursos de mediana entalpia y para formar el primer nivel de la cascada del sistema. De manera similar, tecnologías activadas térmicamente como máquinas de absorción y absorción y bombas de calor juegan un importante rol para mejorar los beneficios de los sistemas en cascada. Estas tecnologías Usualmente requieren temperaturas en el rango de 50-90 °C haciéndolas buenas candidatas para formar el segundo nivel de la cascada del sistema. Por otra parte, existe una amplia gama de procesos industriales, semindustriales, agrícolas y de secado en el rango de 30-70 °C que puede acoplarse

secuencialmente o en paralelo para formar otro nivel de la cascada, aportando más beneficios tanto económicos como ambientales. Es verdad que este tipo de sistema requiere altas inversiones, pero se compensan con los diversos productos obtenidos de un recurso renovable o la combinación con otro sistema convencional de energía y otros recursos renovables.

El uso en cascada de la energía geotérmica es un arreglo secuencial razonable para usar la energía a diferentes niveles térmicos para obtener varios productos. La implementación de la cascada es una propuesta clave en como optimizar el uso racional de la energía, para aprovechar al máximo la utilización de los recursos de mediana y baja entalpia, para reducir el consumo de energía primaria obtenida de combustibles fósiles y para reducir los costos y las dañinas emisiones de gases a la atmósfera. La utilización en cascada de recursos geotérmicos permite obtener múltiples productos de un solo recurso o acoplado a otro recurso renovable, teniendo una mejor utilización y ahorro de energía, y evitando un excesivo consumo de recursos no renovables. La utilización en cascada corresponde a un particular caso de sistemas de energía integrados, también conocidos como sistemas de poli-generación, que se enfocan en el principio de la utilización de uno o más recursos de energía para proveer varios productos más eficientemente que los sistemas convencionales.

Hay una variedad de posibilidades para utilizar la energía geotérmica en forma de cascada, pero en general, es posible identificar dos grupos principales: sistema en cascada con producción eléctrica y usos térmicos y sistemas en cascada que incluyen sólo usos térmicos. Los sistemas en cascada con producción de energía eléctrica es adecuado cuando el recurso geotérmico tiene temperaturas mayores a 90 °C, con más oportunidad de integrar varios niveles térmicos cuando la temperatura aumenta. Los sistemas en cascada con sólo aplicaciones térmicas son apropiado para los recursos geotérmicos con temperaturas por debajo de 90 °C. Sin embargo, esta no es una limitante porque es posible combinar en un sistema híbrido con otros recursos renovables, como energía solar, aumentando el calor geotérmico hasta alcanzar el requerimiento para producir electricidad.

Esta utilización en cascada conduce a proponer nuevos conceptos para el uso integral de los recursos geotérmicos, en general, se puede explicar que los casos presentados tienen un punto de convergencia de los beneficios obtenidos de esta forma de uso de los recursos geotérmicos. Los beneficios principales que pueden destacarse son: una mayor rentabilidad de la instalación, maximizar el uso de los recursos geotérmicos de mediana y baja entalpia, desarrollo local de comunidades y ciudades, así como beneficios sociales y medioambientales. Además, es posible usar varias tecnologías y procesos térmicamente activadas, que se pueden adaptar para las necesidades de cada caso particular. Es importante mencionar que en algunos casos el potencial de mediana y baja entalpia no se han utilizado para generación de electricidad debido a su alto costo inicial y tecnología disponible limitada, utilizando la energía geotérmica solo para aplicaciones de uso directo. Por otro lado, las condiciones climatológicas influyen fuertemente en algunos usos como la calefacción de espacios, el calentamiento de distrito. Los estándares de vida son también un factor importante ya que los usos recreativos son más apropiados para países desarrollados.

Capítulo 3. Comparación de rendimiento energético y exergético de diferentes arreglos de poli-generación que utilizan energía geotérmica en cascada

3.1 Introducción

El análisis exergético es vital para diseñar, optimizar y modelar los sistemas de conversión de energía. El análisis exergético es una metodología que explica la ineficiencia del sistema en términos de destrucción de exergía, es decir, la degradación de la capacidad del sistema para realizar trabajo con respecto a su entorno. En este estudio los sistemas de poligeneración propuestos consideran la generación de electricidad (mediante un subsistema ORC), energía térmica utilizable con alta eficiencia para la producción de frío (subsistema chiller de absorción TAR) y un subsistema para usos directos como deshidratar productos agrícolas, invernaderos y servicios (subsistema intercambiador de calor HX). En particular se enfoca en los recursos geotérmicos de mediana y baja temperatura por debajo de 150 °C hasta 80 °C, y se evalúa el rendimiento de los subsistemas ORC, chiller de absorción SE, chiller de absorción HE y el subsistema de uso directo. El objetivo es presentar un análisis y comparación del rendimiento de diferentes arreglos de los sistemas de poligeneración con el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpia basada en la primera y segunda ley de la termodinámica.

Hoy en día, el consumo de combustibles fósiles continúa satisfaciendo la creciente demanda mundial de energía, lo que significa impactos ambientales y un agotamiento acelerado de las reservas de combustibles fósiles. En recientes años, la atención se ha centrado en encontrar formas más eficientes del uso de la energía, así como el uso de energías renovables para mitigar problemas medioambientales y otras cuestiones energéticas. Por un lado, entre las energías renovables, la energía geotérmica se reporta como una fuente abundante y no intermitente de energía térmica en diferentes regiones del mundo. El potencial de la energía geotérmica es 1814 EJ/año, que 403.2 EJ/año se clasifican como recursos de alta temperatura (más de 150 °C) y 1411.2 EJ/año corresponden a temperatura baja a media (entre 20 °C y 150 °C) [105, 106, 107]. Los recursos geotérmicos de alta temperatura están siendo efectivamente utilizados para la producción de electricidad y la capacidad de instalación sigue creciendo [108]. Sin embargo, a pesar del gran potencial de los recursos geotérmicos de baja a mediana temperatura, no están siendo utilizados masivamente debido a las limitaciones de la tecnología para el uso de calor de baja temperatura para la producción de electricidad, baja eficiencia de conversión de energía así como altos costos de inversión y producción [39, 109]. El uso directo o no eléctrico de la energía geotérmica, que es el uso inmediato de la energía geotérmica, en lugar de convertirla en electricidad, es la forma más común para el uso de recursos geotérmicos de baja temperatura. Los usos directos incluyen, secado, calefacción de espacios, refrigeración, procesos industriales, invernaderos, secado de productos agrícolas, balneología y otros procesos.

Por otro lado, se han propuesto varios métodos dirigidos a aumentar el aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos, reducir los costos de producción y mitigar los impactos ambientales. Estos

métodos incluyen, combinación de calor y potencia (CHP o cogeneración), combinación de calor, refrigeración y potencia (CHCP o tri-generación) y esquemas más complejos conocidos como sistemas multi-generación o poli-generación, que proporcionan diferentes formas de energía y otros productos [110]. Las entradas de combustible a una La poli-generación (incluyendo CHP y CHCP) puede ser combustibles fósiles, energías renovables y una mezcla de diferentes recursos. Sin embargo, la literatura muestra que la energía geotérmica se ha considerado muy poco como un aporte de combustible para CHP, CHCP y poli-generación [111].

Un concepto más que utiliza energía geotérmica como entrada de energía es conocido como el uso en cascada de la energía geotérmica. La utilización en cascada, puede verse como un caso particular de poli-generación, es una adecuada configuración que utiliza calor geotérmico a diferentes niveles de temperatura, en procesos secuenciales obteniendo una serie de productos diferentes, la utilización en cascada, no necesariamente hace uso de los residuos de calor del proceso de conversión de energía para impulsar otros componentes. En cambio, el calor geotérmico se usa secuencialmente para impulsar los componentes o procesos que operan en disposiciones en serie o paralelo. Este concepto es más atractivo para aumentar el uso de los recursos geotérmicos de mediana y baja temperatura porque, aparte de la producción de electricidad, se pueden integrar varios usos directos para aumentar significativamente la eficiencia energética global y disminuir los costos de producción [107, 109, 112, 113]. Aunque la poligeneración (incluida la utilización en cascada) presenta varias ventajas como el uso eficiente de los recursos energéticos, la reducción de costos de producción y menos impactos ambientales; el diseño, la síntesis y la evaluación del desempeño de los sistemas de poli-generación son tareas complejas debido a la gran cantidad de variables involucradas. A fin de evaluar la viabilidad tecnológica y posibles mejoras, se requiere un análisis termodinámico basado en la primera y la segunda ley de la Termodinámica [111]. La literatura muestra que el análisis exergético es una herramienta efectiva para evaluar la viabilidad del sistema porque permite una identificación sistemática del tipo, ubicación y magnitud de las pérdidas de exergía [114]. En la siguiente sección se presenta una revisión de la literatura de diferentes estudios que consideran el recurso geotérmico como entrada de energía en sistemas de CHP, CHCP y poli-generación.

3.2 Revisión de la literatura

Varios estudios muestran que algunos ciclos termodinámicos, incluyendo el Kalina y el Ciclo Rankine Orgánico (ORC), pueden ser impulsados por fuentes geotérmicas a bajas temperaturas. Dado que estos ciclos tienen una baja eficiencia energética, se han estudiado varias mejoras para superar esta limitante. Yari [115] realizó un estudio comparativo de diferentes conceptos de centrales eléctricas geotérmicas basadas en un análisis exergético. Se consideraron dos ciclos de potencia geotérmicos convencionales, un ORC simple con intercambiador de calor interno (IHE), uno regenerativo con IHE, y una combinación de sistemas convencionales y binarios. El análisis mostró que las mejores configuraciones fueron el sistema ORC con un IHE y la versión regenerativa con IHE. Las eficiencias máximas de la primera ley fueron de 7.65% y 15,35%, respectivamente. Guo et al. [116] presentó un análisis energético y exergético de un ORC alimentado por energía geotérmica de baja temperatura. Se determinó el fluido de trabajo más adecuado para condiciones específicas de la fuente de calor. Entre los fluidos de trabajo estudiados, el R245fa presentó condiciones más ventajosas para operar a bajas temperaturas Li et al. [117] investigó el desempeño de un ORC operando a temperaturas entre 70 °C y 100 °C desde el punto de vista energético y exergético. Se determinaron las magnitudes de las irreversibilidades de los principales componentes. Indicaron que una temperatura de 80 °C fue suficiente para alcanzar una eficiencia energética del 7.4%, una eficiencia isentrópica de la turbina de

68% y una eficiencia exergética global del 40%. El análisis también determinó que la destrucción de exergía en los intercambiadores de calor representa casi las tres cuartas partes de la destrucción total de exergía. Walraven et al. [109] investigaron el rendimiento exergético de diferentes tipos de ORC y un ciclo Kalina, trabajando con calor geotérmico con temperaturas entre 100 °C y 150 °C. El estudio incluyó una comparación de 80 fluidos de trabajo, y las versiones subcrítica y transcítica del ORC trabajando a diferentes niveles de presión. Señalaron que los ciclos transcíticos y subcríticos operando a múltiples presiones presentaron mejor desempeño y que una baja temperatura de condensación y una diferencia mínima de temperatura en los intercambiadores de calor son muy importantes para el recurso geotérmico de baja temperatura.

Ya que los recursos geotérmicos de baja temperatura solo para fines de generación de electricidad no son rentables debido a la baja eficiencia energética de los ciclos, la producción combinada de calor y potencia representa una opción viable. Heberle y Brüggemann [118] consideraron un sistema CHP que utiliza recursos energía geotérmica a temperaturas inferiores a 177 °C. Compararon circuitos en serie y en paralelo de un sistema con ORC y generación de calor adicional por medio de un análisis de la segunda ley de la Termodinámica. Encontraron que la configuración más eficiente fue el circuito en serie utilizando isopentano como fluido de trabajo orgánico.

Habka y Ajib [119] analizaron el impacto del suministro de calefacción a un ORC y el rendimiento de la planta operando con dos posibles conexiones de sistema CHP, serie y paralelo. Encontraron que la conexión en paralelo es más económica y la conexión en serie es más eficiente energéticamente. Posteriormente, los mismos autores [120] analizaron las características del rendimiento de un sistema CHP basado en un ORC, centrado en el efecto de la temperatura de reinyección. Los resultados muestran que la demanda de calor, la temperatura de reinyección y las temperaturas de suministro afectaron la configuración final y la potencia neta generada. Sin embargo, una variación adecuada de la temperatura de suministro conduce a una óptima eficiencia energética y exergética. Fiaschi et al. [121] propusieron y analizaron una configuración paralela-cruzada CHP para proporcionar calor a temperatura alta adecuado para uso industrial. La configuración propuesta reduce las irreversibilidades en los intercambiadores de calor y el impacto ambiental relacionado con la reinyección del fluido geotérmico. Se investigaron varios fluidos orgánicos y se encontraron las condiciones de trabajo por optimización. Una integración híbrida más compleja de las plantas de CHP fue presentada e investigada por Habka y Ajib [122]. Estas novedosas integraciones se basan en los esquemas convencionales serie y paralelo y son alimentados por agua geotérmica a 100 °C y una temperatura de reinyección variable. Las simulaciones demostraron que la producción de energía aumenta considerablemente por las configuraciones híbridas, alcanzando eficiencias exergéticas hasta de 71%.

Se ha considerado energía geotérmica de baja a mediana temperatura para producir electricidad y otros productos diferentes al calor. Akbari et al. [123] propusieron y analizaron un sistema de cogeneración, que consiste en un ciclo de Kalina, un transformador de calor LiBr/H₂O y un sistema de purificación de agua, para producir electricidad y agua pura. La energía de entrada fue energía geotérmica a una temperatura de 124 °C y un flujo másico de 89 kg/s. Se aplicaron análisis de primera y segunda ley de la Termodinámica encontrando eficiencias del 16% al 18.2% y del 61.9% al 69.1%, respectivamente. Ghaebi et al. [124, 125] propusieron dos sistemas nuevos de cogeneración que son impulsados por energía geotérmica de baja temperatura. El primer sistema fue un ciclo combinado de refrigeración y potencia integrado por un ciclo de Kalina y un ciclo de refrigeración eyector. Optimizaron la eficiencia energética y exergética, para determinar las variables de diseño óptimo. Entre esas variables de diseño, se incluyó temperatura de entrada geotérmica. El segundo sistema comprendía un ORC modificado con

una regeneración y una membrana electrolítica de intercambio de protones para la producción de electricidad e hidrógeno. Se realizó un análisis energético, exergético y exergoeconómico considerando varios fluidos de trabajo, resultando que el R245fa presentó las máximas eficiencias energéticas y exergéticas.

CHCP y multi-generación son dos métodos que pueden funcionar con energía geotérmica de baja temperatura y están siendo investigados. Akrami et al. [126] investigaron los efectos del flujo másico geotérmico, presión y temperatura de entrada de la turbina en las eficiencias de energía y exergía de un sistema de tri-generación basado en recurso geotérmico que produjo electricidad, calefacción e hidrógeno. Behnam et al. [127] investigaron el desempeño de un sistema pequeño de tri-generación impulsado por recursos geotérmicos de baja temperatura desde las perspectivas termodinámicas y económicas para producir agua dulce, calefacción y electricidad. El sistema comprendía un transformador de absorción de calor, un proceso de desalinización por evaporación de una sola etapa y un ORC. Ratlamwala et al. [128] propusieron una Integración de un sistema de energía geotérmica de doble flash, un sistema de absorción de efecto cuádruple agua-amoniaco y un sistema electrolizador para suministrar refrigeración, calefacción, potencia, agua caliente y producción de hidrógeno. Llevaron a cabo un análisis detallado de la energía y la exergía para estudiar los efectos de la temperatura, flujo másico y presión del recurso geotérmico, así como el efecto de la temperatura ambiente. El estudio mostró que el aumento de la temperatura de entrada, la presión y el flujo másico, también la potencia y la producción de hidrógeno aumentaron. Sin embargo, esto influyó negativamente en la producción de refrigeración. Li et al. [129] analizaron la producción combinada de calor, potencia y recuperación de petróleo utilizando agua geotérmica de 100 °C a 150 °C. Presentaron y compararon un subsistema ORC, un subsistema de transporte de calor y un subsistema de recolección de petróleo trabajando en serie y en paralelo. El análisis fue realizado por primera y segunda ley de la termodinámica, indicando que el R601a mostró el rendimiento más alto del ciclo, y que se prefiere a el circuito en serie para temperaturas altas de entrada de agua geotérmica y temperaturas bajas de entrada de la fuente de calor del sistema de recolección de aceite. Mohammadi y Mehrpooya [130] realizaron un análisis de energía y exergía de un Ciclo Kalina modificado acoplado a un ciclo de vapor y a un sistema de ósmosis inversa. El sistema utiliza agua caliente geotérmica para proporcionar calefacción, enfriamiento, potencia y agua dulce. Se estudiaron los efectos de los parámetros termodinámicos de los componentes individuales en el rendimiento del sistema utilizando un análisis de sensibilidad. Akrami et al. [131, 132] analizaron un sistema multi-generación impulsado por energía geotérmica a partir de puntos de vista energético, exergético y exergo-económico. El sistema está formado por un ORC, un calentador doméstico de agua caliente, un ciclo de refrigeración de absorción de LiBr y un electrolizador de membrana de intercambio de protones, para la producción de electricidad, calefacción, refrigeración e hidrógeno. Investigaron el efecto de la temperatura del agua geotérmica, flujo de masa de agua geotérmica y otros parámetros clave de los componentes.

Finalmente, se estudió formalmente la utilización en cascada de la energía geotérmica por Luo et al. [133], estudiaron un sistema integrado de uso en cascada de agua geotérmica basado en una planta de simple flash de energía geotérmica. El agua geotérmica descargada de la planta se utilizó en cascada para activar dos etapas del sistema de enfriamiento de absorción LiBr/H₂O, secado de productos agrícolas, y para proporcionar calor a agua caliente sanitaria. Se propusieron doce temperaturas posibles en el estudio, y se implementó un análisis relacional jerárquico para determinar el esquema integrado óptimo que maximiza los criterios termodinámicos y económicos. Rubio-Maya et al. [134] condujeron un análisis técnico-económico de un sistema en cascada simple en serie de tres niveles térmicos secuenciales para producir energía eléctrica, hielo y calor útil. Desarrollaron un algoritmo de

optimización simple, basado en modelos energético y económico, para evaluar y determinar el tamaño óptimo del ORC y de las unidades enfriadoras de absorción. Consideraron recursos geotérmicos de baja a mediana temperatura. Ambriz-Díaz et al. [135] presentaron un análisis de la producción secuencial de electricidad, hielo y secado de productos agrícolas. El sistema es un arreglo en cascada destinado para energía geotérmica a mediana y baja temperatura. Analizaron cinco alternativas de integración y cinco modos diferentes de operación del sistema.

3.3 Descripción de los arreglos de poligeneración que trabajan en cascada.

Como se mencionó anteriormente, tres tecnologías térmicas son consideradas para integrar los arreglos potenciales de las plantas de poligeneración: Ciclo Rankine Orgánico (ORC), enfriamiento accionado térmicamente (TAR) e intercambiadores de calor (HX), que producen simultánea y secuencialmente, potencia, refrigeración y calor útil. Dependiendo de la temperatura del fluido geotérmico y la temperatura de diseño requerida para arrancar y operar las tecnologías, se proponen ocho posibles configuraciones: Configuración cascada en serie (SC1, SC2 y SC3, respectivamente), configuración cascada en paralelo (PC), configuración híbrida serie-paralelo (HSP), y configuración híbrida paralelo-serie (HPS1, HPS2 y HPS3, respectivamente). La Figura 40 (a)-(h), muestra los esquemas simbólicos de las ocho configuraciones propuestas. Una descripción detallada de cada arreglo propuesto se da a continuación.

Configuración de cascada en serie (SC1). Esta configuración puede ser considerada como la forma más común de utilizar la energía geotérmica en cascada [113]. La configuración del SC1 consta de tres niveles térmicos, con un componente (dispositivo de conversión de energía) por nivel que opera secuencial y simultáneamente. Según la Figura 40 (a), el subsistema ORC se coloca en el primer nivel, la máquina de refrigeración (TAR) en el segundo nivel y un intercambiador de calor (HX) está acoplado para usos directos en el último nivel. En esta configuración, el ORC convierte la energía del recurso geotérmico para producir electricidad, luego el fluido geotérmico sale del ORC, pasa a través del subsistema TAR y finalmente al subsistema HX para usos directos. La capacidad o tamaño de los subsistemas TAR y HX dependen de la temperatura del fluido geotérmico en la salida del ORC y del subsistema de refrigeración. En esta configuración, todo el flujo másico del fluido geotérmico inicial pasa a través de cada subsistema.

Configuración en cascada en serie 2 (SC2). Este arreglo es una modificación de la configuración SC1, y está compuesta por tres niveles térmicos con un componente por nivel operando secuencialmente y simultáneamente. Según la Figura 40 (g), el flujo geotérmico se divide en dos flujos de manera equitativa, un flujo alimenta el subsistema ORC en el primer nivel, y el segundo se combina con el flujo proveniente del ORC para alimentar la máquina de enfriamiento colocada en el segundo nivel. Finalmente, el flujo másico total se envía al intercambiador de calor. La capacidad de los subsistemas TAR y HX depende de la temperatura del fluido geotérmico resultante en la salida del ORC. Esta configuración es adecuada para condiciones de un gran flujo de fluido geotérmico, baja necesidad de electricidad, necesidades con pequeñas variaciones en la demanda de electricidad y, demandas térmicas considerablemente más altas, como el caso de la planta en cascada geotérmica de Husavik [88].

Configuración en cascada en serie 3 (SC3). Este arreglo es también una modificación de la configuración SC1, consiste en tres niveles térmicos con un componente por nivel que opera secuencial

y simultáneamente. Según la Figura 40 (h), el flujo geotérmico se separa igualmente en dos flujos, uno que alimenta el subsistema ORC y el otro que se mezcla con el flujo que sale del subsistema TAR alimentando el intercambiador HX colocado en el tercer nivel. En este arreglo, la capacidad del subsistema TAR depende de la temperatura de salida del subsistema ORC, mientras que la del subsistema HX depende de la temperatura resultante después de mezclar las corrientes en la salida del TAR. Esta configuración es adecuada para condiciones de un gran flujo geotérmico, bajas necesidades de electricidad y la producción flexible de energía térmica, como en el caso de la planta geotérmica en cascada Neustadt-Gelwe [83].

Configuración de cascada en paralelo (PC). Por simplicidad en esta configuración, el flujo del recurso geotérmico se divide de igual manera para los tres subsistemas. Esta configuración puede ser considerada cuando la temperatura del fluido geotérmico es baja y cumple con la temperatura de funcionamiento requerida para cada tecnología accionada térmicamente, es decir, subsistema ORC, TAR y HX. Una posibilidad más de esta configuración es que el flujo másico geotérmico se puede dividir de acuerdo con la cantidad de energía eléctrica, refrigeración y calor deseados. Todo el sistema está formado de un solo nivel de temperatura y los componentes están integrados en paralelo con producción simultánea pero no secuencial, ver Figura 40 (b). Aunque la capacidad o tamaño de los componentes se puede establecer de acuerdo a las necesidades específicas, el tamaño final del sistema está limitado por la disponibilidad de la energía geotérmica y las limitantes intrínsecas de cada tecnología.

Configuración de cascada híbrida en serie-paralelo (HSP). La configuración híbrida serie-paralelo puede verse como una versión modificada de la configuración serie SC1. En esta configuración, el flujo geotérmico es inicialmente utilizado para la producción de electricidad en el primer nivel de la cascada. Posteriormente, el flujo de salida del ORC alimenta por igual a los subsistemas TAR y HX que trabajan en disposición en paralelo y forman el segundo nivel de la cascada, ver Figura 40 (c). El sistema HSP puede ser apropiado cuando la producción de electricidad tiene prioridad y los otros productos son complementarios.

Configuración de cascada híbrida paralela-serie 1 (HPS1). A diferencia de la configuración HSP, esta configuración es una versión modificada de la configuración de cascada en paralelo (PC). Aquí, la mayor parte de la energía geotérmica se utiliza para usos térmicos y de refrigeración en el primer nivel de la cascada. Luego, los flujos másicos en la salida de los subsistemas TAR y HX se mezclan para alimentar el subsistema ORC formando el segundo nivel de la cascada, ver Figura 40 (d). En esta configuración, el tamaño de los subsistemas TAR y HX se definen en primer lugar y la capacidad del subsistema ORC resulta de las condiciones del primer nivel y las características de la tecnología intrínseca. Esta configuración es apropiada cuando el enfriamiento o calentamiento es un requisito primario y la producción de electricidad es complementario.

Configuración de cascada híbrida serie paralela 2 (HPS2). Esta es una alternativa de la configuración HPS1 pero intercambiando posiciones de los subsistemas ORC y HX. La energía geotérmica se utiliza para producir electricidad y efecto refrigerante en el primer nivel de la cascada. Después, las salidas de flujo másico de los subsistemas ORC y TAR son mezcladas para alimentar el subsistema HX y formar el segundo nivel de la cascada, ver Figura 40 (e). En esta configuración, el tamaño de los subsistemas ORC y TAR se definen en primer término, y la capacidad del subsistema HX resulta de las condiciones de temperatura y caudal a la salida del primer nivel. Esta configuración puede

ser apropiada cuando la electricidad y el enfriamiento son una necesidad primaria, y la producción de calor es complementaria.

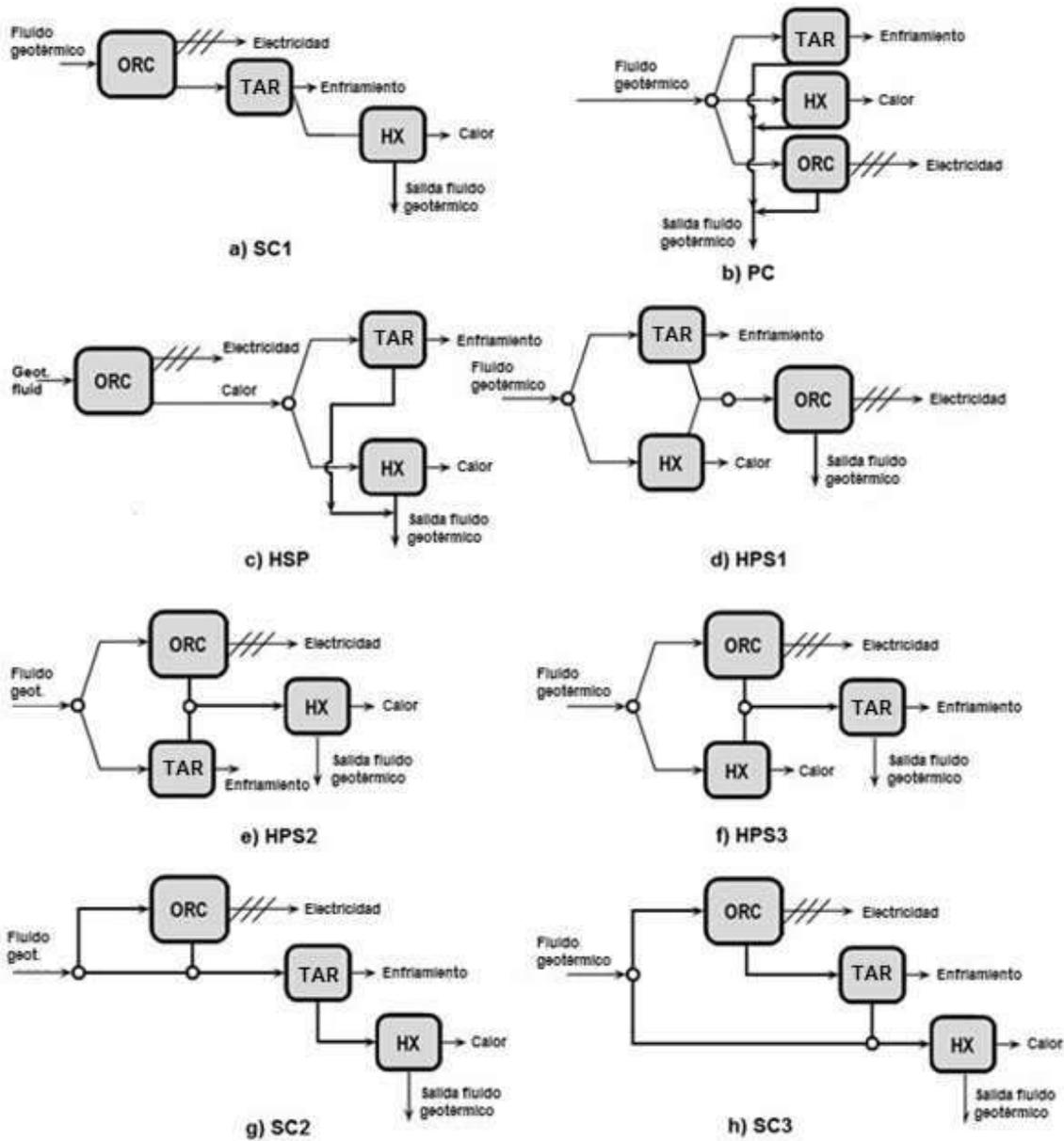


Figura 40. Esquemas simbólicos del sistema en cascada.

Configuración de cascada híbrida paralelo-serie 3 (HPS3). Finalmente, la configuración HPS3 es una modificación de la configuración HPS1 donde se intercambian las posiciones de los subsistemas ORC y TAR. La energía geotérmica se utiliza para producir electricidad y calor en el primer nivel. Luego, el flujo másico de los subsistemas ORC y HX en la salida de cada componente se mezcla para proporcionar calor al subsistema TAR y formar el segundo nivel de la cascada, ver Figura 40 (f). En esta configuración el tamaño o la capacidad de los subsistemas ORC y HX se definen primero y la capacidad del subsistema TAR resulta de las condiciones de temperatura y flujo geotérmico del primer nivel. Esta

configuración puede ser apropiada cuando la generación de electricidad y el calor son necesidades primarias y la producción de refrigeración es complementario.

3.3.1 Tecnologías térmicas consideradas para la integración.

Subsistema ORC. Comúnmente, una máquina ORC tiene dos circuitos de fluido; el primero es el circuito de agua geotérmica-fluido de trabajo, donde el intercambio de calor tiene lugar y el segundo es propiamente el circuito del fluido de trabajo del ORC. El fluido de trabajo del ORC recibe calor del fluido geotérmico, se evapora y produce trabajo mecánico en la turbina. El fluido de trabajo se descarga al condensador, donde el calor de condensación es transferido a un medio de enfriamiento. El líquido se bombea a un nivel más alto de presión al evaporador, completando así el ciclo. En el caso del ORC con intercambiador de calor interno (IHE), conocido como regenerativo, el fluido se descarga al IHE antes de que pase al condensador para calentar el fluido de trabajo después de ser bombeado al evaporador.

Para el ORC con extracción en la turbina, se toma una fracción del fluido de trabajo desde una etapa de la turbina para proporcionar calor al fluido de trabajo antes de entrar al evaporador, que maneja dos niveles de presión diferentes en el proceso de expansión. Las alternativas de ciclo de potencia de ORC a analizar en las disposiciones básicas de poligeneración se muestran esquemáticamente en la Figura 41. Las alternativas (b) y (c) se proponen aquí porque de acuerdo con Safarian y Aramoun [136], disminuyen las pérdidas de exergía del evaporador y aumentan la eficiencia exergetica.

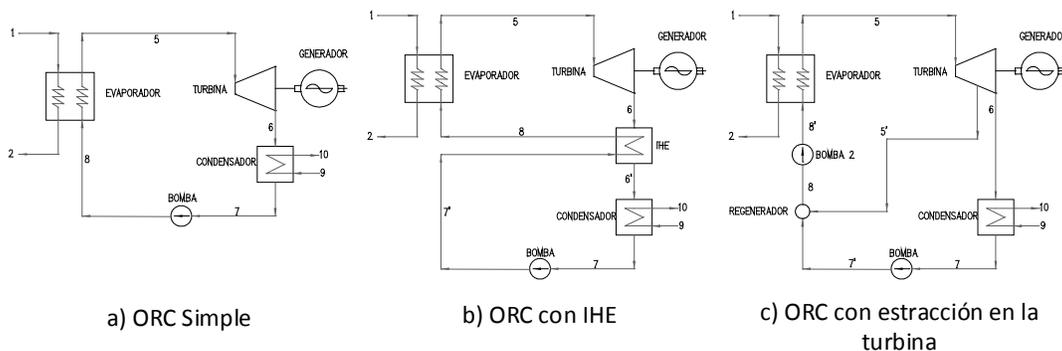


Figura 41. Alternativas del subsistema ORC.

Subsistema de refrigeración por absorción. El efecto de enfriamiento se puede lograr usando máquinas de enfriamiento por absorción con agua-pares de trabajo amoníaco-agua y bromuro de litio-agua. Existen varias tecnologías de enfriamiento, pero en este trabajo solo tres alternativas posibles se consideran: refrigeración por absorción de bromuro de litio-agua de simple efecto, refrigeración por absorción de amoníaco agua de simple efecto y medio efecto. Esta selección se realizó de acuerdo a la temperatura esperada disponible para operar el TAR y la aplicación final del efecto refrigerante. En particular, el enfriamiento por absorción de doble efecto no fue considerado debido a varias limitaciones técnicas en el rango de temperatura en estudio [137]. Sin embargo, para determinar la idoneidad de esta tecnología, otro estudio considerando fuentes geotérmicas de media temperatura debe ser conducido.

Refrigeración por absorción de efecto simple. Un sistema de refrigeración por absorción de simple efecto es el más simple y más utilizado [109,137]. Las Figuras 42 (a) y (b) muestran un ciclo de absorción de un simple efecto que puede ser utilizado en los esquemas de poligeneración propuestos. El ciclo es considerado para ser impulsado por el fluido geotérmico, la Figura 42 (a) corresponde al par

de trabajo LiBr/H₂O y la Figura 42 (b) al par de trabajo NH₃/H₂O. Los componentes principales del ciclo de absorción de simple efecto NH₃/H₂O es un absorbedor, un condensador, un rectificador, un generador, un evaporador, una válvula de expansión del refrigerante, un intercambiador de calor de la solución, una bomba de la solución, y una válvula de expansión de la solución. Los componentes que operan a alta presión son el condensador, rectificador, generador y el intercambiador de calor de la solución, mientras que los dispositivos de baja presión son el absorbedor y el evaporador. Para el ciclo de absorción de un simple efecto LiBr/H₂O (ver Figura 42 a), los componentes internos y los niveles de presión son los mismos que para el ciclo de un simple efecto NH₃/H₂O con la única diferencia de que no se requiere rectificador. Se suministra calor de alta temperatura al generador para evaporar el refrigerante y se utiliza para calentar la solución a la temperatura del absorbedor. Se incluye un intercambiador de calor de la solución para mejorar el rendimiento energético en ambos sistemas, ver Figura 42 (a) y Figura 42 (b). El intercambiador de calor permite precalentar antes la solución absorbente entrando al generador usando el calor de la solución caliente, saliendo del generador.

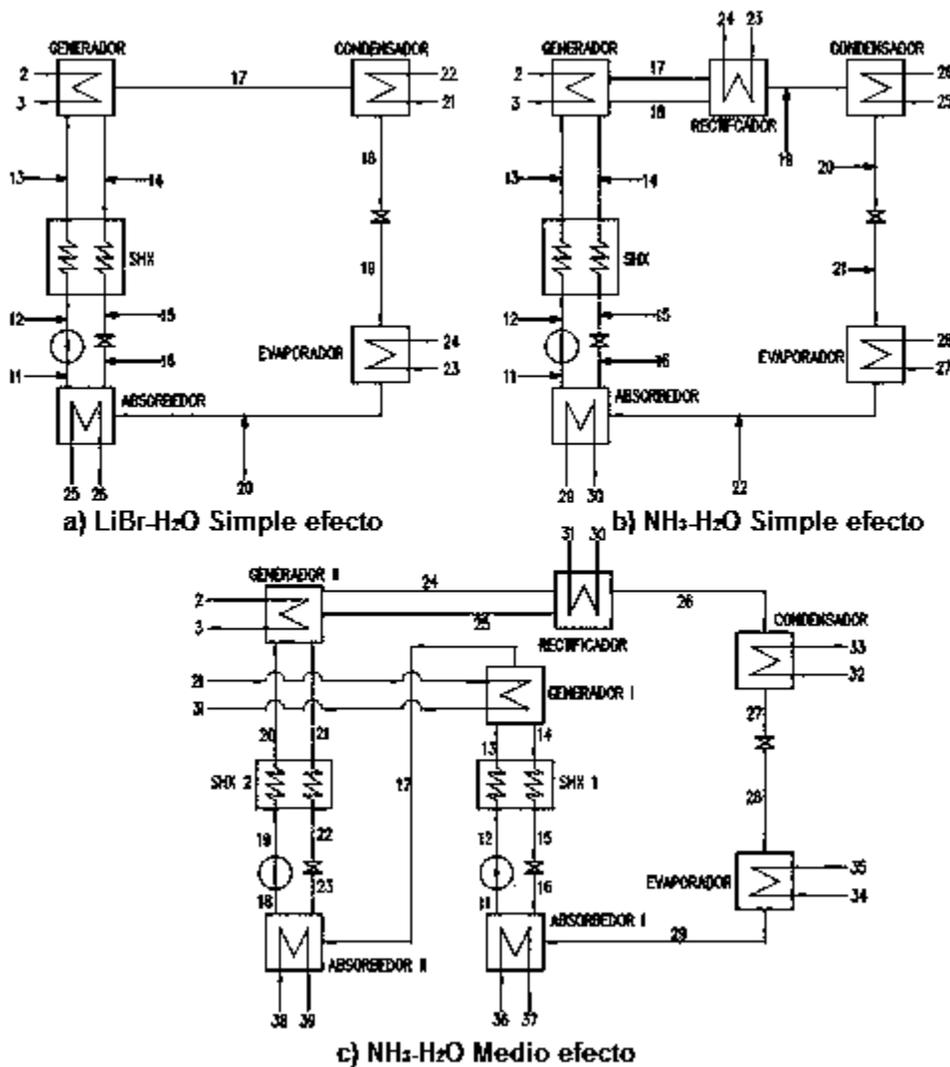


Figura 42. Subsistemas de enfriamiento por absorción.

Refrigeración por absorción de medio efecto. Sistemas de absorción de medio efecto, también conocido como double lift, son considerados para aplicaciones con fuentes de calor de temperatura relativamente baja, alrededor de 70 °C [137]. Figura 42 (c) muestra un diagrama esquemático del ciclo de refrigeración por absorción de NH₃/H₂O de medio efecto. Con referencia a la Figura 42 (c), calor a temperatura media de una fuente externa se transfiere a ambos generadores y ambos absorbentes rechazan el calor a los alrededores. El absorbedor II y el generador I operan a un nivel de presión intermedio. Por lo tanto, el flujo entre el generador I y el absorbedor I, y entre el generador II y el absorbedor II se puede mantener a niveles aceptables. Se debe notar que el coeficiente de rendimiento (COP) del sistema de absorción de medio efecto es más bajo que el de un ciclo de absorción de simple efecto porque más calor es rechazado en el proceso de absorción.

Usos térmicos de tercer nivel. El subsistema que utiliza calor geotérmico para los llamados usos directos como deshidratación de productos agrícolas, invernaderos, etc., es simplemente un intercambiador de calor que comúnmente requiere agua caliente con una temperatura de alrededor de 70 °C [108], donde se enfría por transferencia de energía térmica a la aplicación requerida. Este valor de temperatura fue definido de acuerdo con el diagrama de Lindal [138] que identifica las potenciales aplicaciones y la temperatura requerida para que coincida con algunas aplicaciones específicas de uso directo.

3.4 Metodología

La metodología adoptada para la caracterización de las disposiciones de poli-generación siguen el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 43. Primero, cada disposición incluida en la Figura 40 (a)-(h) se selecciona sobre la misma base según la temperatura y el flujo másico del fluido geotérmico. Luego, se establecen suposiciones generales y termodinámicas de los componentes individuales, así como para el sistema integrado. A continuación, se definen los detalles del tipo de ORC y la aplicación de refrigeración, seguido de una verificación de las limitantes tecnológicas para operar cada componente individual. Finalmente, los balances de masa, energía y exergía se aplican para calcular todos los flujos de energía y exergía, incluyendo parámetros de rendimiento de cada disposición de poli-generación.

Suposiciones

Para realizar el modelado termodinámico de los arreglos de poligeneración que trabajan en cascada, se establecieron el siguiente conjunto de supuestos:

- a) El sistema integrado y todos los subsistemas operan en estado estable y a plena carga.
- b) No hay variación en las demandas de potencia, enfriamiento o térmica a lo largo del año.
- c) Los cambios en la energía cinética y potencial son despreciables.
- d) El fluido geotérmico se considera agua caliente en estado de líquido comprimido.
- e) Las propiedades termodinámicas del agua pura se utilizan para el fluido geotérmico.
- f) El flujo másico del fluido geotérmico se supone a 20 kg/s, porque es un flujo de masa típico de pozos geotérmicos de baja a media temperatura para aplicaciones de cogeneración [139].
- g) La temperatura del fluido geotérmico se considera dentro del rango de 80 °C a 150 °C, ya que cubre el rango de temperatura del pozos geotérmicos clasificados como recursos geotérmicos de bajo grado [139].
- h) La efectividad se considera 0.7 para el proceso de intercambio de calor en aplicaciones de usos directos [140].

- i) Los valores de referencia de entalpia y entropía para los análisis exergéticos se determinan considerando una temperatura ambiente de 20 °C y una presión de 100 kPa.

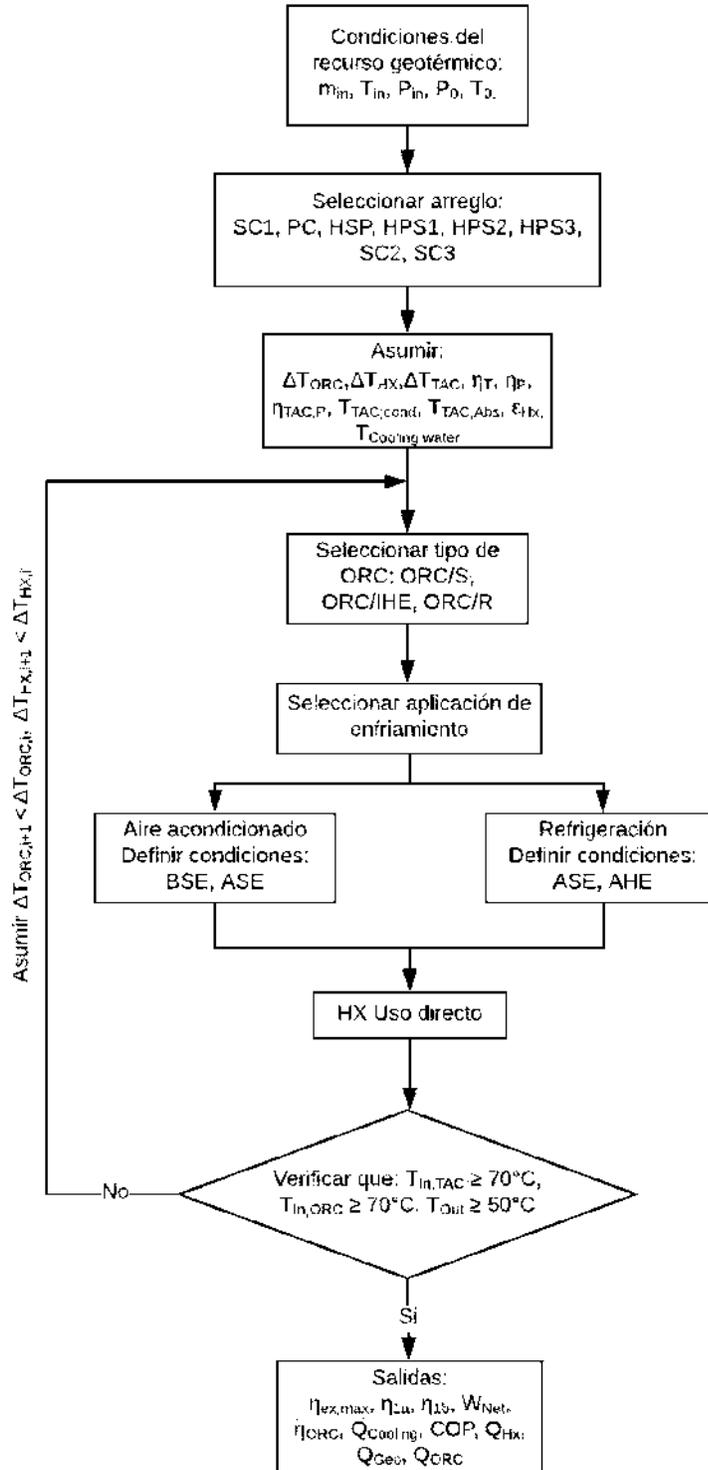


Figura 43. Metodología adoptada para comparación de los arreglos en cascada

Supuestos del subsistema ORC

En este estudio, R245fa es el fluido de trabajo del ORC, ya que es el fluido de trabajo más empleado por los fabricantes [141] y el más apropiado para sistemas de cogeneración geotérmica y baja temperatura del recurso geotérmico [116,118,142]. Otras suposiciones son listadas abajo:

- a) La eficiencia de conversión de energía es una función de la temperatura del fluido caliente en la entrada de este dispositivo.
- b) Las pérdidas de calor a través de los componentes del sistema son insignificantes.
- c) Las turbinas y bombas se consideran con una eficiencia isentrópica de 80% y 75%, respectivamente [143].
- d) La eficiencia del generador eléctrico es del 96% [143].
- e) La temperatura del agua de enfriamiento para los procesos de rechazo de calor es de 25 °C.
- f) La diferencia de temperatura pinch-point en el evaporador y el condensador es de 5 °C [116,143].
- g) El condensador rechaza el calor del agua de enfriamiento.
- h) La presión de evaporación considerada para el R245fa es la correspondiente a la temperatura de saturación.
- i) Por simplicidad, no se considera el sobrecalentamiento en la salida del evaporador.

Suposiciones del subsistema TAR

El tipo de refrigeración y el par de trabajo de la máquina de absorción se definen en función de la temperatura del agua caliente. En este estudio, las máquinas de refrigeración por absorción consideradas son la de LiBr/H₂O de simple efecto (BSE) y NH₃/H₂O de simple efecto (ASE) para aire acondicionado, mientras que se consideran adecuados para la refrigeración solo el par de trabajo NH₃/H₂O de simple efecto y medio efecto (ASE y AHE). Además, las siguientes consideraciones se asumen:

- a) El COP es una función de la temperatura del fluido caliente.
- b) Las pérdidas de calor por componentes internos son insignificantes.
- c) Pérdidas de temperatura y presión del par de trabajo de refrigeración en los procesos de separación y condensación se desprecian.
- d) Las mezclas están en equilibrio tanto en el generador como en el absorbedor a la temperatura de operación [144].
- e) La temperatura del agua de enfriamiento para el proceso de rechazo de calor es de 25 °C.
- f) La eficiencia de la bomba de solución es del 60% [145].
- g) Para aplicaciones de enfriamiento, la temperatura de operación en el evaporador es -11 °C para la congelación [146], 0 °C para la refrigeración [137] y 15 °C para el aire acondicionado.
- h) La temperatura de diseño en el condensador y el absorbedor es de 30 °C
- i) Tanto el condensador como el absorbedor rechazan el calor al agua de enfriamiento.

Propiedades termodinámicas. Para el análisis, es necesario calcular las propiedades termodinámicas del agua geotérmica, el fluido de trabajo del ORC, así como el par de trabajo de los subsistemas de refrigeración por absorción. Para el fluido de trabajo del ORC y la mezcla de amoníaco-agua, se utiliza el software EES® para determinar las propiedades termodinámicas. Para el par de trabajo Bromuro de litio-agua, concentración, entalpía, capacidad calorífica y entropía son determinados utilizando las correlaciones propuestas por Kaita [147].

Análisis energético y exergético. La caracterización termodinámica de los arreglos de poligeneración se basa en balances de masa, energía y exergía en estado estacionario, ecuaciones.(3.1) a la (3.3), respectivamente:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (3.1)$$

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} \left(h_{in} + \frac{1}{2} V_{in}^2 + g z_{in} \right) - \sum \dot{m}_{out} \left(h_{out} + \frac{1}{2} V_{out}^2 + g z_{out} \right) \quad (3.2)$$

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} b_{in} - \sum \dot{m}_{out} b_{out} - \dot{B}_d \quad (3.3)$$

donde \dot{Q} y \dot{W} son la entrada neta de calor y la producción de trabajo, \dot{m} es el flujo de masa del fluido, h es la entalpía, los subíndices in y out para entrada y salida, B_d es la destrucción total de exergía del sistema, T_j es la temperatura a la que se lleva a cabo la transferencia de calor. Por definición la exergía destruida es el producto de la entropía generada en un sistema por la temperatura del estado muerto o del estado de referencia T_0 .

La exergía específica para un flujo másico está dada por

$$b = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3.4)$$

donde el subíndice 0 indica propiedades evaluadas en estado muerto.

Ecuaciones de balance de energía y exergía de componentes.

Los balances de masa, energía y exergía de los subsistemas que integran los diferentes arreglos de poli-generación en estudio se muestran en las Tablas 8, 9, 10 y 11. Para el subsistema ORC, los estados termodinámicos son basados en las corrientes representadas en la Figura 41 (a)-(c), para los subsistemas de enfriamiento e intercambio de calor los estados termodinámicos se basan en las corrientes mostrado en la Figura 42 (a)-(c). Las relaciones energéticas se muestran en las Tabla 8 y Tabla 9, mientras que las relaciones exergéticas se dan en las Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 8. Relaciones de energía para el subsistema ORC.

Equipo	Relaciones de energía		
	Simple	con IHE	con regeneración
Evaporador	$\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_1 C_P (T_1 - T_2)$ $\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_8 (h_5 - h_8)$	$\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_1 C_P (T_1 - T_2)$ $\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_8 (h_5 - h_8)$	$\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_1 C_P (T_1 - T_2)$ $\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_8 (h_5 - h_8)$
Turbina	$\eta_T = \frac{(h_5 - h_6)}{(h_5 - h_{6S})}$ $\dot{W}_T = \dot{m}_5 (h_5 - h_6)$	$\eta_T = \frac{(h_5 - h_6)}{(h_5 - h_{6S})}$ $\dot{W}_T = \dot{m}_5 (h_5 - h_6)$	$\eta_T = \frac{(h_5 - h_6)}{(h_5 - h_{6S})}$ $\dot{W}_T = \dot{m}_5 [(h_5 - h_{5'}) + (1 - y)(h_{5'} - h_6)$
Generador eléctrico	$\dot{W}_e = \dot{W}_T * \eta_G$	$\dot{W}_e = \dot{W}_T * \eta_G$	$\dot{W}_e = \dot{W}_T * \eta_G$
Condensador	$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_6 (h_6 - h_7)$ $\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_9 C_P (T_{10} - T_9)$	$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_6 (h_{6'} - h_7)$ $\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_9 C_P (T_{10} - T_9)$	$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_6 (h_6 - h_7)$ $\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_9 C_P (T_{10} - T_9)$
Bomba	$\eta_P = \frac{(h_{8S} - h_7)}{(h_8 - h_7)}$	$\eta_P = \frac{(h_{71S} - h_7)}{(h_{71} - h_7)}$	$\eta_P = \frac{(h_{71S} - h_7)}{(h_{71} - h_7)}$

	$\dot{W}_P = \dot{m}_7(h_8 - h_7)$	$\dot{W}_P = \dot{m}_7(h_{7i} - h_7)$	$\dot{W}_P = \dot{m}_7(h_{7i} - h_7)$
IHE	NO INCLUIDO	$\dot{Q}_{IHE} = \dot{m}_6(h_6 - h_{6i})$ $\dot{Q}_{IHE} = \dot{m}_{7i}(h_8 - h_{7i})$	NO INCLUIDO
Regenerador	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$y = \frac{h_8 - h_{7i}}{h_{5i} - h_{7i}}$
Bomba 2	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\eta_{P2} = \frac{(h_{8iS} - h_8)}{(h_{8i} - h_8)}$ $\dot{W}_{P2} = \dot{m}_8(h_{8i} - h_8)$

Tabla 9. Relaciones de energía para los subsistemas TAR y HX.

Equipo	Relaciones de energía		
	Simple efecto LiBr-H ₂ O	Simple efecto NH ₃ -H ₂ O	Medio efecto NH ₃ -H ₂ O
Generador	$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_2 C_p (T_2 - T_3)$ $\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{13} h_{13}$	$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_2 C_p (T_2 - T_3)$ $\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{18} h_{18}$	$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_2 C_p (T_2 - T_3)$ $\dot{Q}_{Gen1} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{13} h_{13}$
Rectificador	NO INCLUIDO	$\dot{Q}_{Rec} = \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{18} h_{18} - \dot{m}_{19} h_{19}$ $\dot{Q}_{Rec} = \dot{m}_{23} (h_{24} - h_{23})$	$\dot{Q}_{Rec} = \dot{m}_{24} h_{24} - \dot{m}_{25} h_{25} - \dot{m}_{26} h_{26}$ $\dot{Q}_{Rec} = \dot{m}_{30} (h_{31} - h_{30})$
Condensador	$\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{21} C_p (T_{22} - T_{21})$ $\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{17} (h_{17} - h_{18})$	$\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{25} C_p (T_{26} - T_{25})$ $\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{19} (h_{19} - h_{20})$	$\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{32} C_p (T_{33} - T_{32})$ $\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{26} (h_{26} - h_{27})$
Evaporador	$\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{19} (h_{20} - h_{19})$ $\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{23} (h_{23} - h_{24})$	$\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{21} (h_{22} - h_{21})$ $\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{27} (h_{27} - h_{28})$	$\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{28} (h_{29} - h_{28})$ $\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{34} (h_{34} - h_{35})$
Absorbedor	$\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{20} h_{20} - \dot{m}_{11} h_{11}$ $\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{25} (h_{26} - h_{25})$	$\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{22} h_{22} - \dot{m}_{11} h_{11}$ $\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{29} (h_{30} - h_{29})$	$\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{36} C_p (T_{37} - T_{36})$ $\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{29} h_{29} - \dot{m}_{11} h_{11}$
SHX	$\epsilon_{SHX} = \frac{(T_{13} - T_{12})}{(T_{14} - h_{12})}$	$\epsilon_{SHX} = \frac{(T_{13} - T_{12})}{(T_{14} - h_{12})}$	$\epsilon_{SHX} = \frac{(T_{13} - T_{12})}{(T_{14} - h_{12})}$
Bomba	$\eta_P = \frac{(h_{12S} - h_{11})}{(h_{12} - h_{11})}$ $\dot{W}_{P,TAR} = \dot{m}_{11} (h_{12} - h_{11})$	$\eta_P = \frac{(h_{12S} - h_{11})}{(h_{12} - h_{11})}$ $\dot{W}_{P,TAR} = \dot{m}_{11} (h_{12} - h_{11})$	$\eta_P = \frac{(h_{12S} - h_{11})}{(h_{12} - h_{11})}$ $\dot{W}_{P,TAR} = \dot{m}_{11} (h_{12} - h_{11})$
Válvula 1	$h_{15} = h_{16}$	$h_{15} = h_{16}$	$h_{15} = h_{16}$
Válvula 2	$h_{18} = h_{19}$	$h_{20} = h_{21}$	$h_{27} = h_{28}$
Generador II	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{Q}_{Gen2} = \dot{m}_2 C_p (T_2 - T_3)$ $\dot{Q}_{Gen2} = \dot{m}_{21} h_{121} + \dot{m}_{24} h_{24} - \dot{m}_{20} h_{20} - \dot{m}_{25} h_{125}$
Absorbedor II	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{38} C_p (T_{39} - T_{38})$ $\dot{Q}_{ABS2} = \dot{m}_{23} h_{23} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{18} h_{18}$
SHX II	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\epsilon_{SHX2} = \frac{(T_{20} - T_{19})}{(T_{21} - h_{19})}$
Bomba 2	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\eta_P = \frac{(h_{19S} - h_{18})}{(h_{19} - h_{18})}$ $\dot{W}_{P,TAR2} = \dot{m}_{18} (h_{19} - h_{18})$
Válvula 3	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$h_{22} = h_{23}$
HX	$\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_3 C_p (T_3 - T_4)$ $\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_{27} (h_{28} - h_{27})$	$\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_3 C_p (T_3 - T_4)$ $\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_{31} (h_{32} - h_{31})$	$\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_3 C_p (T_3 - T_4)$ $\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_{40} (h_{41} - h_{40})$

Tabla 10. Relaciones exergéticas para el subsistema ORC.

Equipo	Relaciones de exergía		
	Simple	con IHE	con regeneración
Evaporador	$\dot{B}_{D,Eva} = (\dot{B}_1 + \dot{B}_8) - (\dot{B}_2 + \dot{B}_5)$	$\dot{B}_{D,Eva} = (\dot{B}_1 + \dot{B}_8) - (\dot{B}_2 + \dot{B}_5)$	$\dot{B}_{D,Eva} = (\dot{B}_1 + \dot{B}_{8'}) - (\dot{B}_2 + \dot{B}_5)$
Turbina	$\dot{B}_{D,T} = (\dot{B}_5 - \dot{B}_6) - \dot{W}_T$	$\dot{B}_{D,T} = (\dot{B}_5 - \dot{B}_6) - \dot{W}_T$	$\dot{B}_{D,T} = (\dot{B}_5 - \dot{B}_{5'} - \dot{B}_6) - \dot{W}_T$
Generador eléctrico	$\dot{B}_{D,G} = \dot{W}_T - \dot{W}_e$	$\dot{B}_{D,G} = \dot{W}_T - \dot{W}_e$	$\dot{B}_{D,G} = \dot{W}_T - \dot{W}_e$
Condensador	$\dot{B}_{D,Cond} = (\dot{B}_6 + \dot{B}_9) - (\dot{B}_7 + \dot{B}_{10})$	$\dot{B}_{D,Cond} = (\dot{B}_{6'} + \dot{B}_9) - (\dot{B}_7 + \dot{B}_{10})$	$\dot{B}_{D,Cond} = (\dot{B}_6 + \dot{B}_9) - (\dot{B}_7 + \dot{B}_{10})$
Bomba	$\dot{B}_{D,P} = (\dot{B}_7 - \dot{B}_8) + \dot{W}_P$	$\dot{B}_{D,P} = (\dot{B}_7 - \dot{B}_{7'}) + \dot{W}_P$	$\dot{B}_{D,P} = (\dot{B}_7 - \dot{B}_{7'}) + \dot{W}_P$
IHE	NO INCLUIDO	$\dot{B}_{D,IHE} = (\dot{B}_6 + \dot{B}_{7'}) - (\dot{B}_{6'} + \dot{B}_8)$	NO INCLUIDO
Regenerador	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{B}_{D,Reg} = (\dot{B}_{5'} + \dot{B}_{7'}) - \dot{B}_8$
Bomba 2	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{B}_{D,P2} = (\dot{B}_8 - \dot{B}_{8'}) + \dot{W}_{P2}$

Tabla 11. Relaciones de exergía para los subsistemas TAR y HX.

Equipo	Relaciones de exergía		
	Simple efecto LiBr-H ₂ O	Simple efecto NH ₃ -H ₂ O	Medio efecto NH ₃ -H ₂ O
Generador	$\dot{B}_{D,Gen} = (\dot{B}_2 + \dot{B}_{13}) - (\dot{B}_3 + \dot{B}_{14} + \dot{B}_{17})$	$\dot{B}_{D,Gen} = (\dot{B}_2 + \dot{B}_{13} + \dot{B}_{18}) - (\dot{B}_3 + \dot{B}_{14} + \dot{B}_{17})$	$\dot{B}_{D,Gen1} = (\dot{B}_{2'} + \dot{B}_{13}) - (\dot{B}_{3'} + \dot{B}_{14} + \dot{B}_{17})$
Rectificador	NO INCLUIDO	$\dot{B}_{D,Rec} = (\dot{B}_{17} + \dot{B}_{23}) - (\dot{B}_{18} + \dot{B}_{19} + \dot{B}_{24})$	$\dot{B}_{D,Rec} = (\dot{B}_{24} + \dot{B}_{30}) - (\dot{B}_{25} + \dot{B}_{26} + \dot{B}_{31})$
Condensador	$\dot{B}_{D,Conden} = (\dot{B}_{17} + \dot{B}_{21}) - (\dot{B}_{18} + \dot{B}_{22})$	$\dot{B}_{D,Conden} = (\dot{B}_{19} + \dot{B}_{25}) - (\dot{B}_{20} + \dot{B}_{26})$	$\dot{B}_{D,Conden} = (\dot{B}_{26} + \dot{B}_{32}) - (\dot{B}_{27} + \dot{B}_{33})$
Evaporador	$\dot{B}_{D,Evap} = (\dot{B}_{19} + \dot{B}_{23}) - (\dot{B}_{20} + \dot{B}_{24})$	$\dot{B}_{D,Evap} = (\dot{B}_{21} + \dot{B}_{27}) - (\dot{B}_{22} + \dot{B}_{28})$	$\dot{B}_{D,Evap} = (\dot{B}_{28} + \dot{B}_{34}) - (\dot{B}_{29} + \dot{B}_{35})$
Absorbedor	$\dot{B}_{D,Abs} = (\dot{B}_{20} + \dot{B}_{16} + \dot{B}_{25}) - (\dot{B}_{11} + \dot{B}_{26})$	$\dot{B}_{D,Abs} = (\dot{B}_{22} + \dot{B}_{16} + \dot{B}_{29}) - (\dot{B}_{11} + \dot{B}_{30})$	$\dot{B}_{D,Abs} = (\dot{B}_{29} + \dot{B}_{16} + \dot{B}_{36}) - (\dot{B}_{11} + \dot{B}_{37})$
SHX	$\dot{B}_{D,SHX} = (\dot{B}_{12} + \dot{B}_{14}) - (\dot{B}_{13} + \dot{B}_{15})$	$\dot{B}_{D,SHX} = (\dot{B}_{12} + \dot{B}_{14}) - (\dot{B}_{13} + \dot{B}_{15})$	$\dot{B}_{D,SHX} = (\dot{B}_{12} + \dot{B}_{14}) - (\dot{B}_{13} + \dot{B}_{15})$
Bomba	$\dot{B}_{D,P,TAR} = (\dot{B}_{11} - \dot{B}_{12}) + \dot{W}_{P,TAT}$	$\dot{B}_{D,P,TAR} = (\dot{B}_{11} - \dot{B}_{12}) + \dot{W}_{P,TAT}$	$\dot{B}_{D,P,TAR} = (\dot{B}_{11} - \dot{B}_{12}) + \dot{W}_{P,TAT}$
Válvula 1	$\dot{B}_{D,Valv1} = (\dot{B}_{15} - \dot{B}_{16})$	$\dot{B}_{D,Valv1} = (\dot{B}_{15} - \dot{B}_{16})$	$\dot{B}_{D,Valv1} = (\dot{B}_{15} - \dot{B}_{16})$
Válvula 2	$\dot{B}_{D,Valv2} = (\dot{B}_{18} - \dot{B}_{19})$	$\dot{B}_{D,Valv2} = (\dot{B}_{20} - \dot{B}_{21})$	$\dot{B}_{D,Valv2} = (\dot{B}_{27} - \dot{B}_{28})$
Generador II	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{B}_{D,Gen2} = (\dot{B}_2 + \dot{B}_{20} + \dot{B}_{25}) - (\dot{B}_2 + \dot{B}_{21} + \dot{B}_{24})$
Absorbedor II	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{B}_{D,Abs2} = (\dot{B}_{17} + \dot{B}_{23} + \dot{B}_{38}) - (\dot{B}_{18} + \dot{B}_{39})$
SHX II	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{B}_{D,SHX2} = (\dot{B}_{19} + \dot{B}_{21}) - (\dot{B}_{20} + \dot{B}_{22})$
Bomba 2	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{B}_{D,P,TAT2} = (\dot{B}_{18} - \dot{B}_{19}) + \dot{W}_{P,TAT2}$
Válvula 3	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{B}_{D,Valv3} = (\dot{B}_{22} - \dot{B}_{23})$
HX	$\dot{B}_{D,HX} = (\dot{B}_3 + \dot{B}_{27}) - (\dot{B}_4 + \dot{B}_{28})$	$\dot{B}_{D,HX} = (\dot{B}_3 + \dot{B}_{31}) - (\dot{B}_4 + \dot{B}_{32})$	$\dot{B}_{D,HX} = (\dot{B}_3 + \dot{B}_{40}) - (\dot{B}_4 + \dot{B}_{41})$

Parámetros de rendimiento energético y exergético.

Para realizar la comparación de los diferentes arreglos de poligeneración que trabajan en cascada, se calculan los parámetros de desempeño basados en los conceptos de energía y exergía. La eficiencia de la Primera Ley puede ser expresada en dos formas, la definición común basada en la relación de

salidas de energía y entradas de energía, y otra expresión que se conoce como la eficiencia de utilización [114,148].

La Primera Ley de eficiencia expresada como la relación de salidas de energía (tres salidas en este estudio) y la entrada de energía actual por calor geotérmico es [114,148]:

$$\eta_{1b} = \left(\frac{W_{Net} + \dot{Q}_{Cooling} + \dot{Q}_{DU}}{\dot{Q}_{Geo}} \right) \quad (3.5)$$

$$\dot{Q}_{Geo} = \dot{m}_1 C p_{w1} (T_1 - T_4) \quad (3.6)$$

La eficiencia de la Primera Ley vista como la eficiencia de utilización, es la relación de salidas de energía útiles entre la entrada de energía máxima disponible [148,149]. Para los arreglos de poligeneración en el presente estudio, puede ser expresado como:

$$\eta_{1a} = \left(\frac{W_{Net} + \dot{Q}_{Cooling} + \dot{Q}_{DU}}{\dot{Q}_{max}} \right) \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}_1 (h_1 - h_0) \quad (3.8)$$

La diferente forma de las ecuaciones (3.5) y (3.7) pueden explicarse considerando que \dot{Q}_{Geo} en la ecuación (3.5) representa el calor real transferido desde el agua caliente geotérmica al sistema de poligeneración y \dot{Q}_{max} en la ecuación (3.7) representa el máximo calor teórico que el agua caliente geotérmica puede entregar al sistema de poligeneración, condición alcanzada cuando el agua caliente se enfría a la temperatura ambiente. Para fines de comparación, la eficiencia de utilización tiene más significado porque todas las disposiciones de poligeneración pueden compararse con la misma base de energía.

Dado que el sistema tiene salidas de diferente calidad termodinámica, el concepto de exergía es más útil para comparaciones de rendimiento energético. Así, la eficiencia exergética del sistema de poligeneración geotérmica puede expresarse como [114,148]:

$$\eta_{ex} = \left(\frac{W_{Net} + \dot{B}_{Cooling} + \dot{B}_{DU}}{\dot{B}_{in}} \right) \quad (3.9)$$

$$\dot{B}_{in} = \dot{B}_1 - \dot{B}_4 = \dot{m}_1 C p_w \left(T_1 - T_4 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_4} \right) \quad (3.10)$$

3.5 Resultados y discusión

Siguiendo el diagrama de flujo representado en la Figura 43, todas las suposiciones, restricciones y las ecuaciones de las Tablas 8, 9, 10 y 11, fueron escritas y codificadas usando el software EES®. Los resultados de las simulaciones se presentan en esta sección, en primer lugar se analizan y comparan todos los arreglos de poligeneración propuestos a la temperatura más alta disponible en este estudio que es 150 °C. Esto permite una comparación de rendimiento de todas las configuraciones trabajando con la temperatura más alta del recurso geotérmico. En segundo lugar, para determinar la influencia de la temperatura del recurso geotérmico en las tecnologías de accionamiento térmico adecuado para cada

arreglo, todos los arreglos fueron proyectados a diferentes temperaturas del recurso geotérmico en el rango de 80 °C a 150 °C.

3.5.1 Comparación de disposiciones de poligeneración (temperatura a 150 ° C)

La Figura 44 muestra la comparación del rendimiento exergético para los ocho arreglos de poligeneración propuestos. Estos resultados comparan el rendimiento del sistema a una temperatura del recurso geotérmico de 150 °C, que caracterizan el caso con la mayor exergía disponible. Se puede ver que la configuración SC1 presenta una eficiencia exergética de 52.2% como el valor más alto entre todas las configuraciones, mientras que la disposición HPS3 presenta el rendimiento exergético más bajo con un 48.2%. Comparando los resultados, se puede ver que la configuración SC1 tiene una ventaja marginal de un 0.2% más de eficiencia de energía en comparación con la disposición HPS2 que tiene una eficiencia exergética del 51.96%.

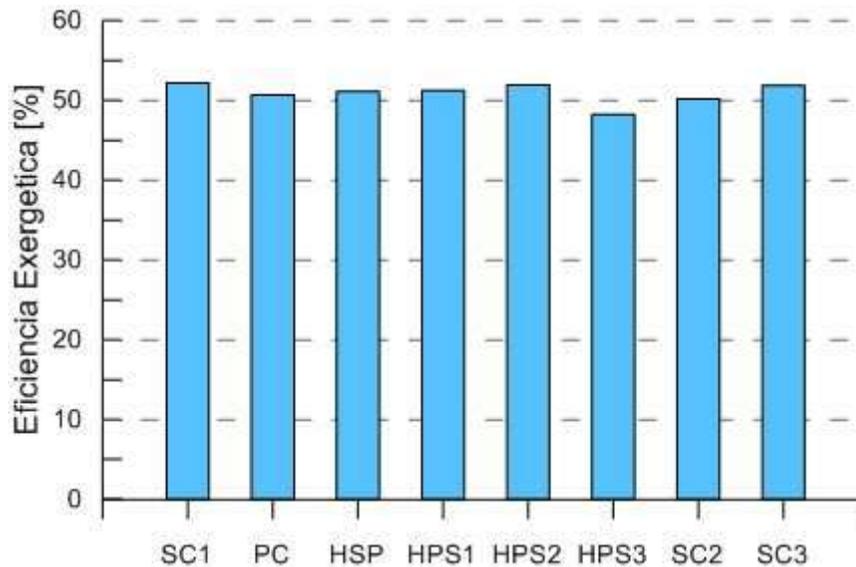


Figura 44. Eficiencia exergética de los arreglos de poligeneración basada a 150 °C de temperatura.

Dado que la disposición SC1 es el sistema que ofrece mejores beneficios entre todas las configuraciones proyectadas, esta disposición fue analizada energéticamente mediante un diagrama de Sankey. La Figura 45 muestra el diagrama de Sankey que representa cómo se transforma la energía dentro del sistema SC1. Se puede observar que la energía disponible correspondiente a 20 kg/s del fluido geotérmico a 150 °C es de 10965.9 kW, con solo 2022.2 kW en productos útiles (3622.4 kW de electricidad, 478.8 kW de enfriamiento y 1181 kW de calor útil en el sistema de usos directos) 3523.6 kW rechazados al agua de enfriamiento y 5866.0 kW para reinyección. Cabe señalar que la cantidad de la energía para la reinyección es el 53.5% de la energía disponible, lo que indica que todavía hay una oportunidad de usos directos adicionales de esta cantidad de energía, mejorando el rendimiento del sistema. La eficiencia de utilización de este arreglo es del 18.4%.

Para tener una mejor idea de cómo se explota y destruye la exergía, un diagrama de distribución de exergía para el arreglo SC1 ha sido calculado. La Figura 46 muestra un diagrama de Grassmann que muestra cómo la exergía es usada y destruida dentro del sistema SC1. Se puede ver que la exergía disponible correspondiente a 20 kg/s de fluido geotérmico a 150 °C es 1292.0 kW y solo 694.29 kW se.

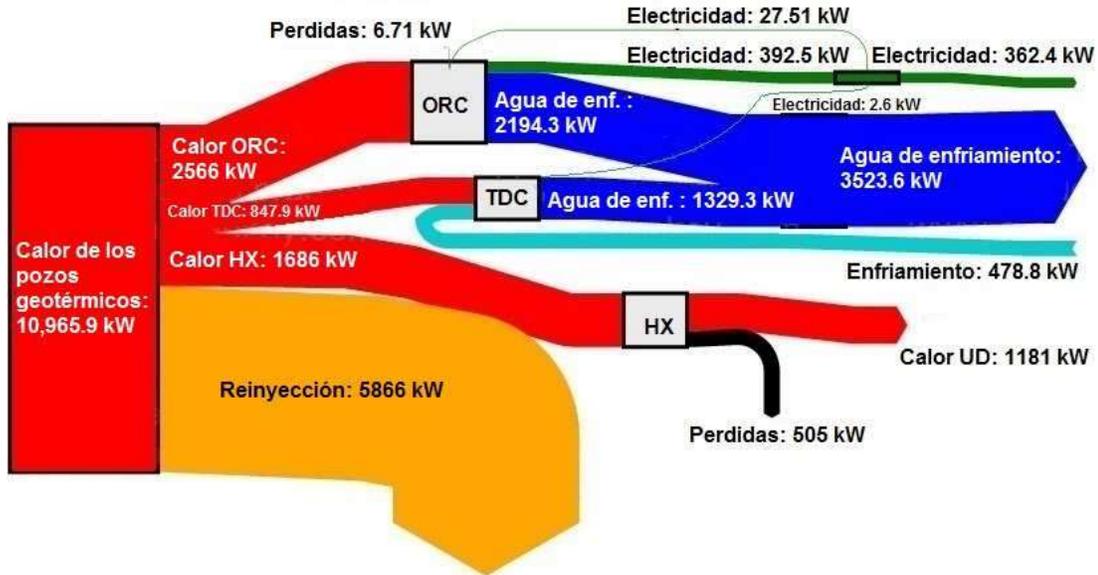


Figura 45. Diagrama de Sankey para la configuración SC1 operando a 150 °C.

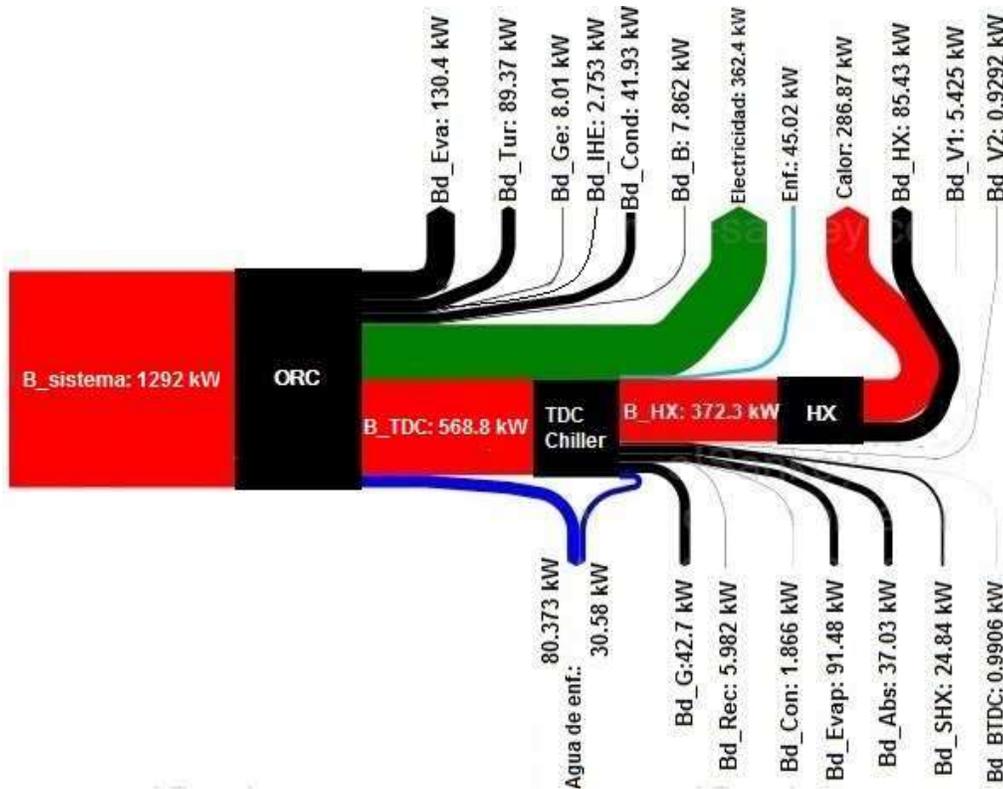


Figura 46. Diagrama de Grassmann para el SC1 trabajando a temperatura de 150 °C.

obtienen como exergía útil, y 110.95 kW son rechazados al agua de enfriamiento. El subsistema ORC destruye 360.7 kW (la suma de la destrucción de exergía del evaporador, la turbina, el generador eléctrico, el IHE, el condensador y la bomba), el subsistema TAR 241.82 kW (suma de las destrucciones de exergía del generador, rectificador, condensador, evaporador, absorbador, del SHX, la

válvula 1 y válvula 2) y el subsistema HX 85.43 kW. El rendimiento exergético de este sistema es del 52.2%. Una mejor manera de representar la distribución de exergía implicaría el valor económico de cada una de las tres salidas de energía. Sin embargo, debido al alcance de este estudio no está incluido aquí.

La Tabla 12 se presenta para una mejor comprensión de los componentes que integran cada arreglo de poligeneración, los valores de las diferentes salidas y parámetros de rendimiento. Se puede ver que para una temperatura del agua caliente geotérmica de 150 °C, los componentes de conversión de energía que comprenden el sistema para todos los arreglos son el ORC (ORC/IHE) con intercambiador de calor interno y la máquina de absorción de amoníaco-agua (ASE). Además, también se puede observar que el arreglo SC1 presenta los productos más altos, con 362.4 kW de potencia neta, 478.8 kW de refrigeración y 1181 kW de calor para usos directos. Información adicional como el flujo másico, temperatura de entrada y salida para cada componente interno principal de las disposiciones de poligeneración se enumera en la Tabla 13. Se puede ver que la Tablas 12 y la Tabla 13 también muestran la temperatura de agua caliente geotérmica de 110 °C y 80 °C, sin embargo estos resultados se discuten en la siguiente sección.

Tabla 12. Comparación de arreglos de poligeneración para agua caliente a temperaturas de 150 °C, 110 °C y 80 °C.

Parámetro	Arreglo							
	SC1	PC	HSP	HPS1	HPS2	HPS3	SC2	SC3
T_{in} =150 °C								
Tipo de ORC	ORC/IHE							
Tipo de TAR	ASE							
T _{out} (°C)	90	130	105	105	110.08	115	105.05	110.08
Q _{in} (kW)	5097	1714	3835	3835	3411	2990	3836	3413
Potencia neta (kW)	362.4	121	363.7	329.4	181.5	180.1	180.4	181.2
Q _{cooling} (kW)	478.8	160.9	239.4	241.4	241.4	480.1	481.6	239.4
Q _{UD} (kW)	1181	400.2	592.4	600.3	1189	600.3	1187	1189
η _{ORC} (%)	14.22	14.22	14.22	12.96	14.22	14.22	14.22	14.22
COP	0.563	0.560	0.563	0.560	0.560	0.563	0.562	0.563
η _{1a} (%)	18.43	6.22	10.90	10.68	14.70	11.49	16.86	14.68
η _{1b} (%)	39.66	39.8	31.17	30.54	47.26	42.16	48.2	47.17
η _{ex} (%)	52.19	50.69	51.12	51.23	51.96	48.21	50.20	51.87
T_{in} =110 °C								
Tipo de ORC	ORC/IHE	ORC/IHE	ORC/R	ORC/IHE	ORC/IHE	ORC/R	ORC/R	ORC/R
Tipo de TAR	ASE	ASE	AHE	ASE	ASE	ASE	ASE	AHE
T _{out} (°C)	50	90	65	65	70	75	65	70
Q _{in} (kW)	5032	1686	3780	3780	3362	2944	3781	3363
Potencia neta (kW)	241.3	83.07	254.5	192.3	125.8	119	122.7	127.1
Q _{cooling} (kW)	399.1	157.9	143.6	236.9	236.9	368.8	288.2	143.6
Q _{UD} (kW)	1171	393.5	586	590.3	587.1	590.3	1173	1174
η _{ORC} (%)	9.987	9.987	10.08	10.08	9.98	10.08	10.08	10.08

COP	0.470	0.558	0.342	0.558	0.558	0.435	0.529	0.342
η_{1a} (%)	23.98	8.4	13.03	13.50	20.33	14.27	23.08	19.13
η_{1b} (%)	36.00	37.64	26.03	26.97	45.68	36.62	46.12	42.97
η_{ex} (%)	51.44	50.43	50.11	48.40	49.07	48.07	49.65	48.18
$T_{in} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$								
Tipo de ORC	ORC/IHE							
Tipo de TAR	AHE	AHE	AHE	ASE	ASE	AHE	AHE	AHE
T_{out} ($^\circ\text{C}$)	50	60	55	50	50	60	50	50
Q_{in} (kW)	2510	1674	2092	2510	2510	1674	2510	2510
Potencia neta (kW)	41.42	41.83	41.74	44.39	57.56	20.36	41.39	20.71
$Q_{cooling}$ (kW)	273.2	95.73	136.6	198.8	198.8	286.8	273.2	136.6
Q_{UD} (kW)	585.3	390.7	585.5	293.2	585.3	293.2	585.3	1171
η_{ORC} (%)	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02
COP	0.325	0.342	0.325	0.468	0.468	0.341	0.325	0.325
η_{1a} (%)	17.90	10.51	15.19	10.67	16.74	11.94	17.90	26.42
η_{1b} (%)	35.86	31.55	36.51	21.37	33.53	36.86	35.85	52.92
η_{ex} (%)	41.18	44.18	42.82	32.82	39.10	38.35	38.82	42.64

Tabla 13. Flujo másico, temperaturas de entrada y salida de los componentes de los arreglos de poligeneración para agua caliente a temperaturas de 150 $^\circ\text{C}$, 110 $^\circ\text{C}$ y 80 $^\circ\text{C}$.

Componente	Parámetro	Arreglos							
		SC1	PC	HSP	HPS1	HPS2	HPS3	SC2	SC3
$T_{in} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$									
ORC	\dot{m} (kg/s)	20	6.67	20	20	10	10	10	10
	T_{in} ($^\circ\text{C}$)	150	150	150	135	150	150	150	150
	T_{out} ($^\circ\text{C}$)	120	120	120	105	120	120	120	120
TAR	\dot{m} (kg/s)	20	6.67	10	10	10	20	20	10
	T_{in} ($^\circ\text{C}$)	120	150	120	150	150	125	135	120
	T_{out} ($^\circ\text{C}$)	110	140	110	140	140	115	125	110
HX	\dot{m} (kg/s)	20	6.66	10	10	20	10	20	20
	T_{in} ($^\circ\text{C}$)	110	150	120	150	130	150	125	130
	T_{out} ($^\circ\text{C}$)	90	130	100	130	110	130	105	110
$T_{in} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$									
ORC	\dot{m} (kg/s)	20	6.67	20	20	10	10	10	10
	T_{in} ($^\circ\text{C}$)	110	110	110	95	110	110	110	110
	T_{out} ($^\circ\text{C}$)	80	80	90	65	80	80	80	80
TAR	\dot{m} (kg/s)	20	6.67	10	10	10	20	20	10
	T_{in} ($^\circ\text{C}$)	80	110	90	110	110	85	95	80
	T_{out} ($^\circ\text{C}$)	70	100	80	100	100	75	85	70
HX	\dot{m} (kg/s)	20	6.66	10	10	20	10	20	20
	T_{in} ($^\circ\text{C}$)	70	110	90	110	90	110	85	90

	T _{out} (°C)	50	90	70	90	70	90	65	70
T_{in} = 80 °C									
ORC	\dot{m} (kg/s)	20	6.67	20	20	10	10	10	10
	T _{in} (°C)	80	80	80	70	80	80	80	80
	T _{out} (°C)	70	50	70	50	60	70	60	70
TAR	\dot{m} (kg/s)	20	6.67	10	10	10	20	20	10
	T _{in} (°C)	70	80	70	80	80	70	70	70
	T _{out} (°C)	60	70	60	70	700	60	60	60
HX	\dot{m} (kg/s)	20	6.66	10	10	20	10	20	20
	T _{in} (°C)	60	80	70	80	65	80	60	70
	T _{out} (°C)	50	60	50	70	50	70	50	50

3.5.2 Efecto de la temperatura del recurso geotérmico sobre los arreglos de poligeneración.

Los recursos geotérmicos de mediana y baja entalpia se pueden encontrar a diferentes valores de temperatura, comúnmente en el rango de 80 °C a 150 °C. La temperatura geotérmica es un factor crucial que determina el tipo de tecnologías de accionamiento térmico para integrar y la disposición más adecuada para una situación en particular. Cada tecnología accionada térmicamente está diseñada para lograr el máximo rendimiento en un determinado valor de la temperatura. Típicamente, las variaciones de temperatura afectan el rendimiento del componente. Para investigar el efecto de la temperatura de los recursos geotérmicos en la configuración de poligeneración en cascada y en el desempeño de cada componente, el sistema ha sido simulado considerando que la temperatura de operación puede ser encontrada entre 80 °C y 150 °C.

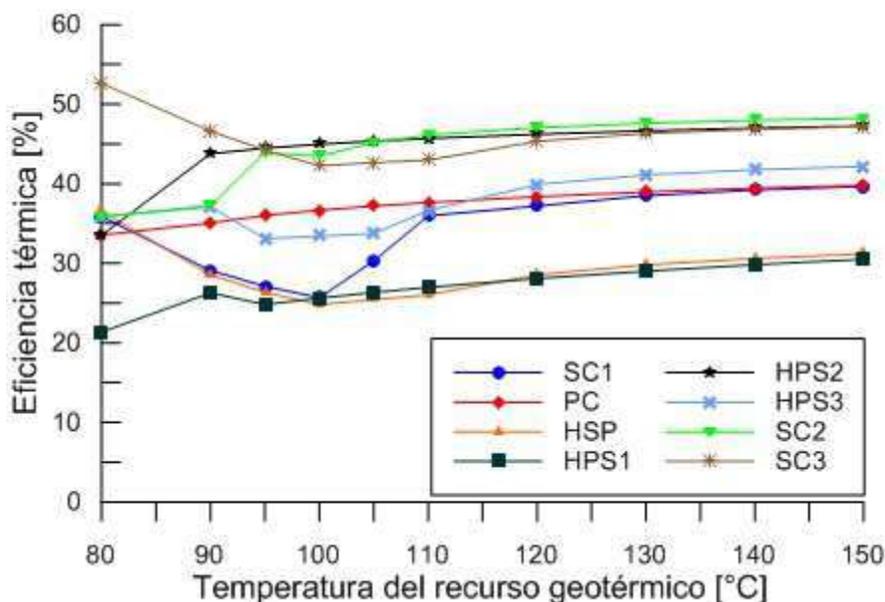


Figura 47. Eficiencia térmica vs temperatura del recurso geotérmico.

La Figura 47 muestra los resultados de la eficiencia térmica para todos los arreglos de poligeneración a diferentes temperaturas del recurso geotérmico. Se puede observar, que hay dos sistemas que presentan las mayores eficiencias térmicas en el rango de temperatura estudiado, tales sistemas son el HPS2 y el SC2 con un 45% aproximadamente. Sin embargo, la mayor eficiencia térmica alcanzada entre todas las configuraciones es la de la disposición SC3 que opera a la temperatura del recurso geotérmico más baja, que es de 80 °C. Se puede observar que las curvas pertenecientes a los arreglos SC3 y SC1 cambian su pendiente drásticamente a 100 °C y 110 °C, respectivamente. Esto puede explicarse considerando la Tabla 12 y Tabla 13 que muestran los principales parámetros de poligeneración para todos los arreglos a una temperatura de entrada de agua caliente de 110 °C y 80 °C. Se puede ver que a menor temperatura geotérmica de entrada para impulsar el subsistema ORC, la temperatura en la salida de ORC no coincide con el requisito de temperatura para impulsar el subsistema TAR de simple efecto haciendo uso del subsistema TAR de medio efecto que tiene un COP más bajo, lo que reduce significativamente la eficiencia energética global a estos valores de temperatura.

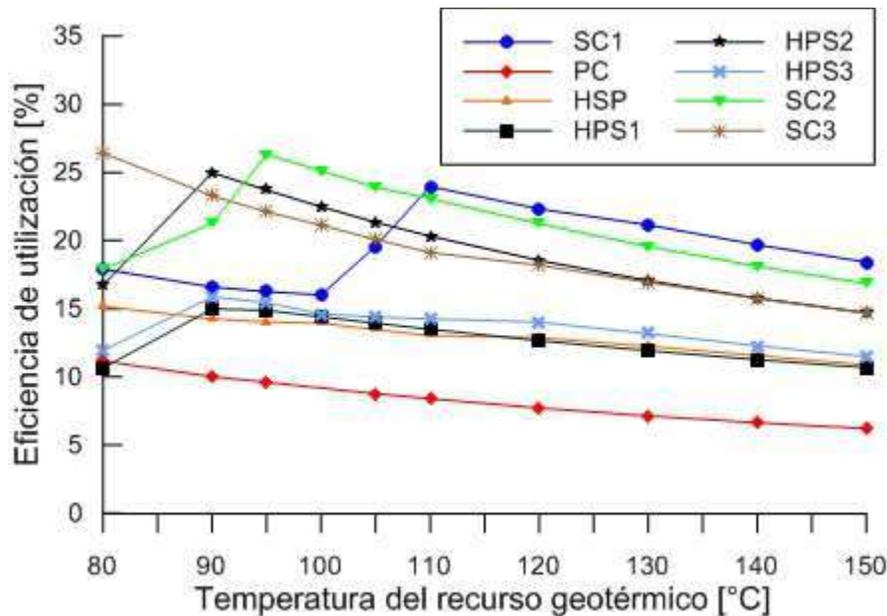


Figura 48. Eficiencia de utilización vs temperatura del recurso geotérmico.

La Figura 48 muestra los resultados de la eficiencia de utilización de la energía para los sistemas de poligeneración funcionando a diferentes temperaturas del recursos geotérmicos. Se puede observar dos sistemas que presentan las más altas eficiencias de utilización, pero solo en un rango de temperatura reducido entre 90 °C y 100 °C. Estos arreglos son el SC2 y el HPS2, con 26.3 y 24.9 % activados a 95 °C y 90 °C, respectivamente. La eficiencia de estos sistemas disminuye significativamente, fuera de este rango de temperatura. El arreglo SC1 tiene la más alta eficiencia en el rango de 110-150 °C. La PC es la configuración con la menor eficiencia de utilización porque la energía disponible se divide en tres corrientes iguales y la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida en los subsistemas son relativamente pequeñas con respecto a los otros sistemas. La disminución de la eficiencia de utilización de la energía a una temperatura superior a 110 °C se atribuye al hecho de que hay más calor teórico disponible para la cascada y existe la posibilidad de incluir más niveles térmicos. Por ejemplo,

considerando el arreglo SC1 en las Tablas 12 y 13, la temperatura de salida (T_{out}) correspondiente a 110 °C y 80 °C es 50 °C en ambos casos, mientras que la temperatura de reinyección correspondiente a una temperatura de entrada de 150 °C es de 90 °C. Esto representa la oportunidad de agregar más niveles térmicos reduciendo la temperatura de reinyección por debajo de 90 °C y aumentando la eficiencia de utilización de la energía.

La Figura 49 muestra el comportamiento de los ocho arreglos propuestos para poligeneración que comprende un ORC simple, un subsistema de absorción para refrigeración amoníaco-agua de simple efecto y un intercambiador de calor. Los resultados mostrados en la Figura 49 indican, en primer lugar, que más allá de 110 °C, el rendimiento exergético para todas las configuraciones se vuelve estable con pequeñas variaciones. Sin embargo, para temperaturas inferiores a 110 °C, el rendimiento exergético cambia muy significativamente. Por otro lado, el arreglo con el rendimiento exergético más alto es el SC1 con 52.9 % a una temperatura de 130 °C. Los resultados indican que a temperaturas más bajas la eficiencia del sistema disminuye, porque el rendimiento del subsistema ORC disminuye a medida que la temperatura de operación disminuye, y el COP del subsistema de absorción de un simple efecto disminuye drásticamente cuando la temperatura desciende por debajo de 80 °C. También se puede observar que los arreglos HPS2 y el SC3 presentan un buen desempeño, con 51.96 % y 51.87 % a una temperatura de 150 °C. Cabe mencionar que el desempeño de estos dos sistemas se vuelven más estables para bajas temperaturas (80–100 °C). Además, el sistema con el menor rendimiento para el rango completo de temperatura de operación es el sistema HPS3. Esto es debido a que el subsistema de absorción se coloca en el segundo nivel de el sistema que afecta al rendimiento individual del subsistema y en consecuencia, el rendimiento global del sistema. Este efecto se puede explicar ya que se utiliza menos energía geotérmica, porque la temperatura más baja de operación para el subsistema de absorción está limitada a 70 °C. Por debajo de este valor, el sistema de refrigeración por absorción no puede producir el efecto de enfriamiento.

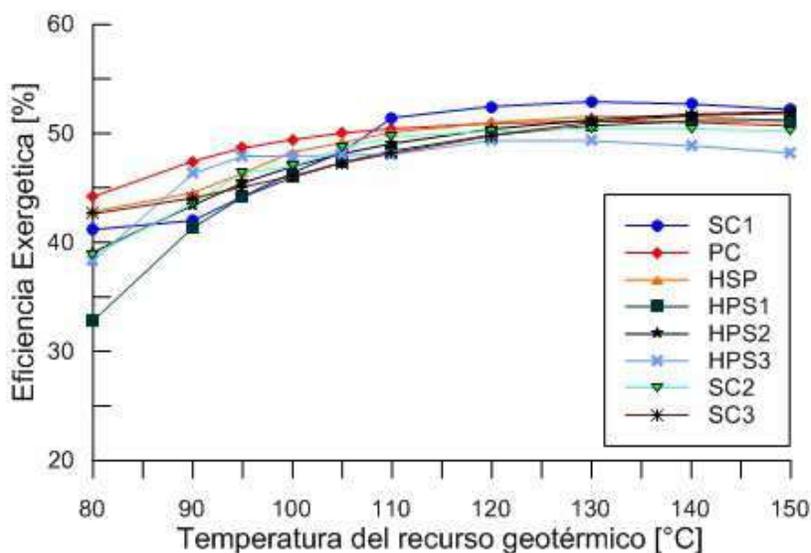


Figura 49. Eficiencia exergetica vs temperatura del recurso geotérmico.

La Figura 50 muestra los resultados para la potencia y el enfriamiento producidos por las disposiciones de poligeneración a diferentes temperaturas del recurso geotérmico. El calor útil para aplicaciones

directas no se incluye en la Figura 50, debido a que este producto muestra menos variación a diferentes temperaturas del recurso geotérmico. Se puede observar que la disposición SC1, operando a una temperatura de 150 °C, proporciona los máximos beneficios en los productos producidos. Esta situación se mantiene en el rango de 100 °C a 150 °C. También hay dos sistemas con buen rendimiento; estos son los arreglos HSP y HPS1 con 363.7 kW y 329.4 kW, respectivamente. Sin embargo, ambos arreglos tienen una baja capacidad de enfriamiento porque solo la mitad del flujo total se dirige al TAR, con una capacidad de enfriamiento de 239.4 kW y 241.4 kW, respectivamente. Considerando el enfriamiento para aplicaciones de congelación, hay dos disposiciones con mayor capacidad que la configuración SC1 pero la producción de potencia es baja. Estos arreglos son el HPS3 y el SC2 con 480.1 kW y 481.6 kW de enfriamiento, 180.1 kW y 180.4 kW de potencia neta, respectivamente.

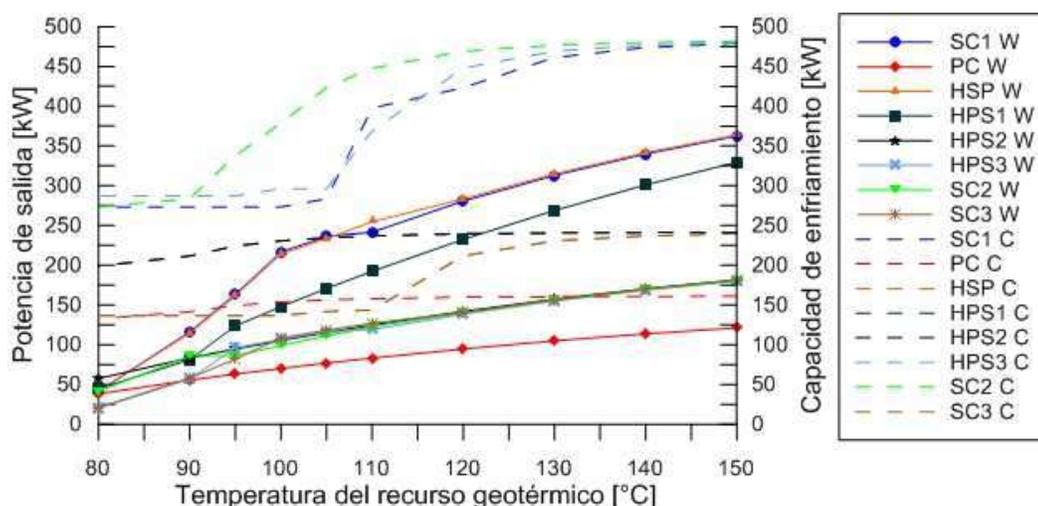


Figura 50. Potencia y enfriamiento vs temperatura del recurso geotérmico.

3.5.3 Comparación basada en la aplicación de refrigeración para la disposición SC1

Los arreglos básicos en estudio pueden resultar en diferentes subclasificaciones debido a las diferentes alternativas disponibles para el ORC y las máquinas de refrigeración por absorción. Para presentar detalles sobre el tipo de tecnología integrada para una determinada configuración en la eficiencia de energía y exergía. La Tabla 14 se presenta para una mejor comprensión. Cabe mencionar que solo la disposición SC1 a sido considerada porque es el arreglo de poligeneración que resulta con el más alto rendimiento y beneficios.

Tabla 14. Sub-clasificación basada en variaciones de las tecnologías térmicamente activadas.

Sub-clasificación	Tecnología ORC	Tecnología de absorción	Propósito de enfriamiento
SAHE	Simple	Amoniaco-agua media efecto	Aire acondicionado/Refrigeración
SASE	Simple	Amoniaco-agua simple efecto	Aire acondicionado/Refrigeración
SBSE	Simple	Bromuro de Litio- simple efecto	Aire acondicionado
IAHE	Incluye IHE	Amoniaco-agua media efecto	Aire acondicionado/Refrigeración
IASE	Incluye IHE	Amoniaco-agua simple efecto	Aire acondicionado/Refrigeración
IBSE	Incluye IHE	Bromuro de Litio- simple efecto	Aire acondicionado
RAHE	Regenerativo	Amoniaco-agua media efecto	Aire acondicionado/Refrigeración
RASE	Regenerativo	Amoniaco-agua simple efecto	Aire acondicionado/Refrigeración

RBSE	Regenerativo	Bromuro de Litio- simple efecto	Aire acondicionado
------	--------------	---------------------------------	--------------------

Enfriamiento para aire acondicionado.

Los resultados mostrados en las Figuras 51–54 se refieren a la disposición SC1 con TAR con enfriamiento utilizado para aire acondicionado. En primer lugar, la Figura 51 muestra la eficiencia térmica para la combinación de tecnologías mostrada en la Tabla 14. Se puede ver que la subclasificación de IBSE es la de mayor desempeño energético en el rango de temperatura estudiado, teniendo una eficiencia del 53.5% a una temperatura de 80 °C. Esto se puede explicar porque la cantidad de energía suministrada al subsistema ORC se reduce dejando así más energía térmica disponible para el segundo y tercer nivel de la cascada, resultando en un mejor uso de la energía geotérmica. También se puede observar que las líneas de todos los arreglos cambian su pendiente significativamente a 100 °C. Esto se atribuye al efecto combinado de la menor eficiencia energética del ORC a bajas temperaturas y al cambio de tecnología TAR utilizada para la refrigeración. Por ejemplo, cambiando la temperatura de funcionamiento de 110 °C a 100 °C, se reduce la eficiencia energética del ORC de 10.1 a 8.8 % y el COP cambia muy drásticamente de 0.47 a 0.26 (debido a un cambio de TAR de simple efecto a medio efecto). Entonces de 100 °C a 80 °C, la eficiencia del ORC disminuye de 8.8 % a 5 % y el COP y efectividad del HX se mantiene casi constante, reflejando un incremento en la eficiencia térmica global porque hay más cantidad de calor para uso directo.

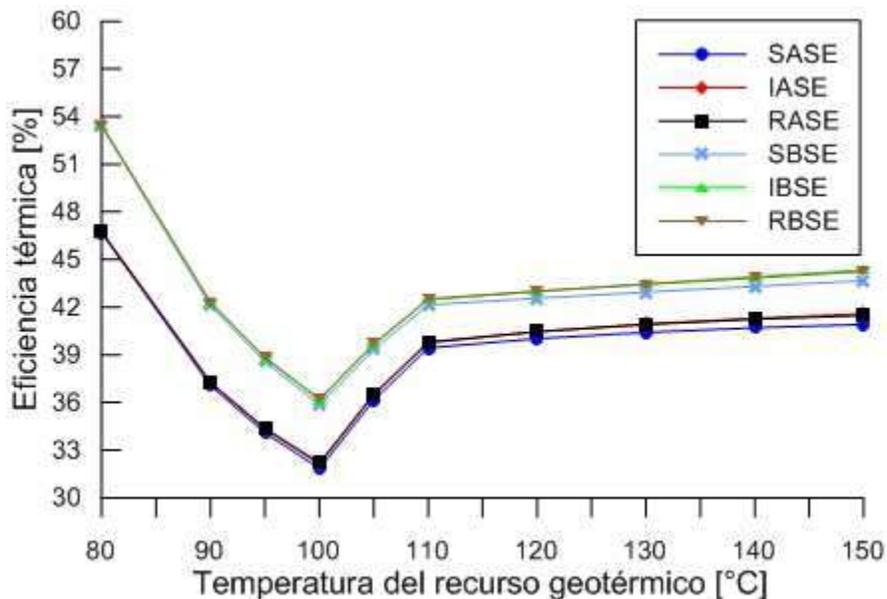


Figura 51. Eficiencia térmica vs temperatura el recurso geotérmico (aire acondicionado).

La Figura 52 muestra los valores de la eficiencia de utilización de energía, encontrando que los sistemas IBSE y RBSE tienen el mayor rendimiento sobre todo el rango de temperatura estudiado. Se puede apreciar que la más alta eficiencia de utilización es del 28.3 % a una temperatura de 110 °C. Esto es porque la temperatura de 110 °C presenta las condiciones más adecuadas para el funcionamiento combinado de las tecnologías integradas, rechazando una cantidad mínima de energía térmica. Este efecto se puede ver en la Tabla 15, donde la temperatura del agua caliente de 150 °C, 110 °C, 100 °C y 80 °C se enumeran.

La Figura 53 muestra los resultados a diferentes temperaturas de activación. Se observa que el sistema con mayor rendimiento es el IBSE con 50.2 % a 150 °C, seguido del arreglo RBSE, que tiene solo una diferencia del 0.2 %. Este comportamiento se mantiene durante todo el rango temperatura estudiado Se puede observar también que a altas temperaturas el sistema IBSE presenta un mejor rendimiento, mientras que a bajas temperaturas el RBSE es el arreglo que ofrece un mejor rendimiento.

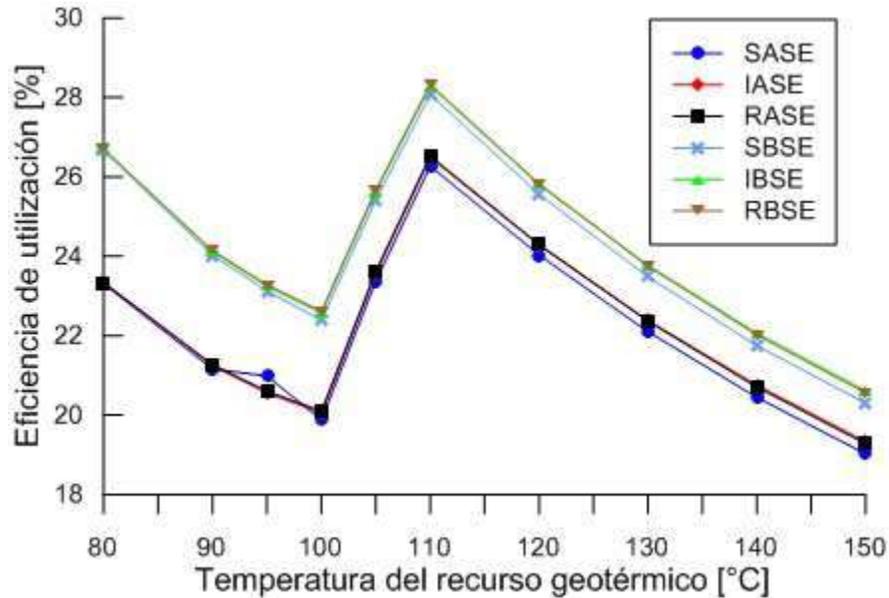


Figura 52. Eficiencia de utilización vs temperatura del recurso geotérmico.

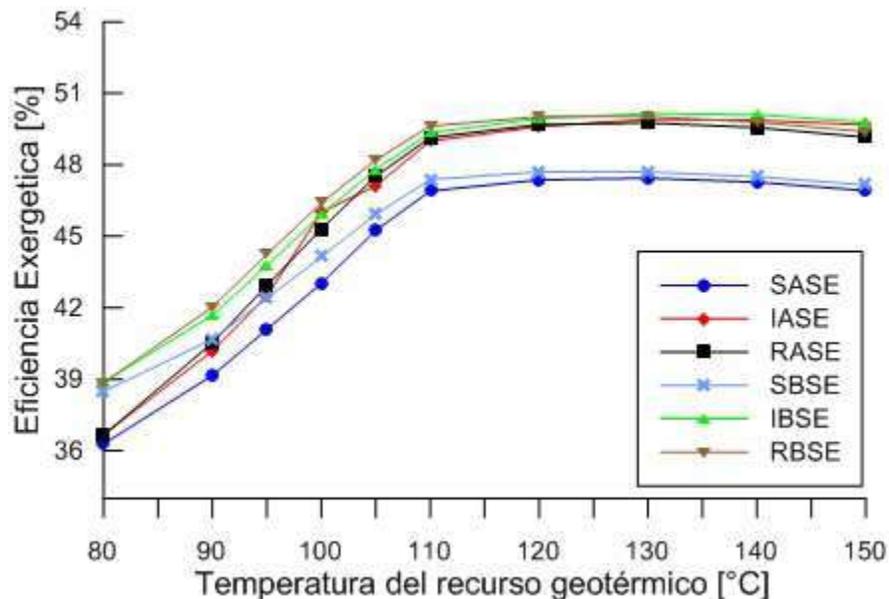


Figura 53. Eficiencia exergética vs temperatura del recurso geotérmico.

La Figura 54 muestra el comportamiento de los productos de los diferentes arreglos de poligeneración impulsados por diferentes temperaturas del recurso geotérmico. Se observa que la producción de enfriamiento permanece casi constante en todo el rango de temperaturas para el arreglo que utiliza la máquina de bromuro de litio de simple efecto. En el caso del subsistema de simple efecto amoniaco-agua, existe una pequeña variación incrementando la capacidad de enfriamiento a temperaturas más altas a 100 °C. El sistema que produce más potencia es el arreglo IBSE con 368 kW a una temperatura de 150 °C (Ver Tabla 15).

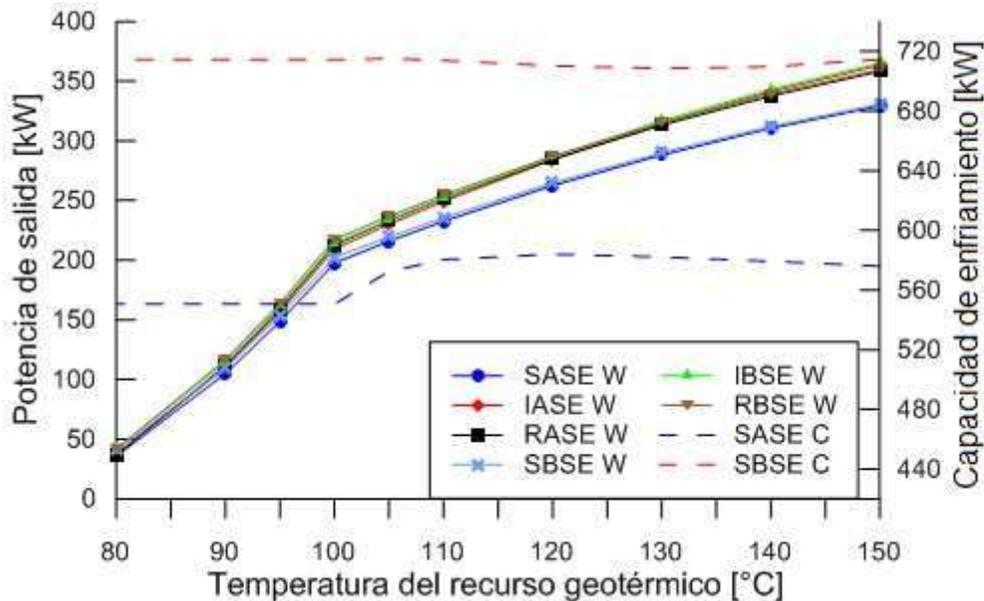


Figura 54. Productos de la poligeneración vs temperatura del recurso geotérmico (aire acondicionado).

3.5.4 Enfriamiento para refrigeración / congelación.

Los resultados mostrados en las Figuras 55–58 se refieren también a la disposición SC1 pero el TAR destinado a enfriamiento para fines de refrigeración. Figura 55 muestra el comportamiento de la eficiencia energética global en el rango de temperatura desde 80 °C a 150 °C. Se puede observar que el arreglo basado en la subclasificación IASE es también la que tiene el mejor desempeño en el rango de temperatura de 110 °C a 150 °C, con el mayor valor de eficiencia del 39.7 % a 150 °C. La Figura 56 muestra los valores de la eficiencia de utilización, observando que las configuraciones IASE y RASE presentan el mayor rendimiento en el rango de temperatura de 110 °C a 150 °C, teniendo la más alta eficiencia de utilización del 24 % a 110 °C. Las Figuras 55 y 56 muestran también que las líneas para todos los arreglos cambian su pendiente drásticamente a 110 °C. En este caso, una temperatura de funcionamiento a 110 °C y 100 °C resulta en una disminución del 10.1 % al 8.8 % de la eficiencia del ORC y una caída en la COP de 0.69 a 0.65 para el subsistema TAR de simple efecto, mientras que para el subsistema TAR de medio efecto se reduce el COP de 0.34 a 0.32. Teniendo en cuenta el caso operando a una temperatura de 100 °C y 80 °C, la eficiencia del ORC disminuye de 8.8 % a 5.0 % mientras que el COP y la efectividad del HX se mantiene casi constantes. A pesar de la reducción del rendimiento energético individual, esto representa un aumento de la eficiencia térmica y de utilización global a bajas temperaturas, debido a la mayor cantidad de calor disponible en el tercer nivel de la cascada. Esto explica las drásticas variaciones de los parámetros de energía y exergética para todas las disposiciones por debajo de 110 °C.

Tabla 15. Arreglo SC1 basado en aplicación de aire acondicionado (temperatura de entrada a 150 °C, 110 °C, 100 °C y 80 °C).

Parámetro	Subclasificación											
	SBSE	IBSE	RBSE	SASE	IASE	RASE	SBSE	IBSE	RBSE	SASE	IASE	RASE
TAR Tipo	BSE	BSE	BSE	ASE	ASE	ASE	BSE	BSE	BSE	ASE	ASE	ASE
ORC Tipo	ORC/S	ORC/IHE	ORC/R	ORC/S	ORC/IHE	ORC/R	ORC/S	ORC/IHE	ORC/TB	ORC/S	ORC/IHE	ORC/R
	T _{in} =150 °C						T _{in} =110 °C					
ΔT _{ORC} [°C]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
T _{out} [°C]	90	90	90	90	90	90	50	50	50	50	50	50
Potencia neta [kW]	330.9	368	359.9	329.4	363.5	358.3	235.7	252.2	254.7	232.7	249.3	251.8
Q _{enfriamiento} [kW]	714.6	714.6	714.6	576	576	576	713.9	713.9	713.9	580.4	580.4	580.4
Q _{UD} [kW]	1181	1181	1181	1181	1181	1181	1171	1171	1171	1171	1171	1171
η _{ORC} [%]	12.89	14.22	14.02	12.89	14.22	14.02	9.33	9.987	10.08	9.33	9.987	10.08
COP	0.838	0.838	0.838	0.676	0.676	0.676	0.845	0.845	0.845	0.690	0.690	0.690
η _{1a} [%]	20.3	20.61	20.56	19.02	19.33	19.28	28.07	28.29	28.32	26.27	26.49	26.52
η _{1b} [%]	43.67	44.34	44.24	40.92	39.43	41.49	42.14	42.47	42.52	39.43	39.76	39.81
η _{ex} [%]	47.15	49.78	49.39	46.92	50.63	49.16	47.38	49.34	49.63	46.9	49.00	49.14
	T _{in} =100 °C						T _{in} =80 °C					
ΔT _{ORC} [°C]	30	30	30	30	30	30	10	10	10	10	10	10
T _{out} [°C]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Potencia neta [kW]	202.5	214.3	217.5	197.6	209.4	212.6	40.76	42.04	41.96	35.84	37.12	37.04
Q _{enfriamiento} [kW]	714.4	714.4	714.4	550.7	550.7	550.7	714.4	714.4	714.4	550.7	550.7	550.7
Q _{UD} [kW]	585.3	585.3	585.3	585.3	585.3	585.3	585.3	585.3	585.3	585.3	585.3	585.3
η _{ORC} [%]	8.042	8.509	8.636	8.042	8.509	8.636	4.866	5.02	5.01	4.866	5.02	5.01
COP	0.846	0.846	0.846	0.654	0.6543	0.654	0.846	0.846	0.846	0.654	0.654	0.654
η _{1a} [%]	22.39	22.57	22.62	19.88	20.05	20.1	26.67	26.69	26.69	23.31	23.34	23.33
η _{1b} [%]	35.86	36.14	36.22	31.84	32.12	32.19	53.41	53.46	53.45	46.69	46.74	46.73
η _{ex} [%]	44.14	45.93	46.41	43.03	46.01	45.3	38.49	38.88	38.85	36.29	36.68	36.66

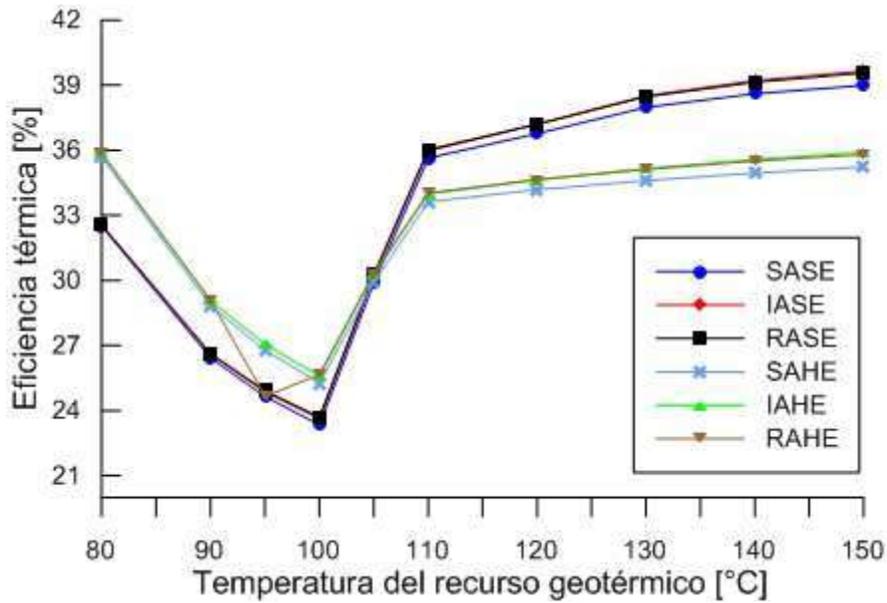


Figura 55. Eficiencia térmica vs temperatura del recurso geotérmico.

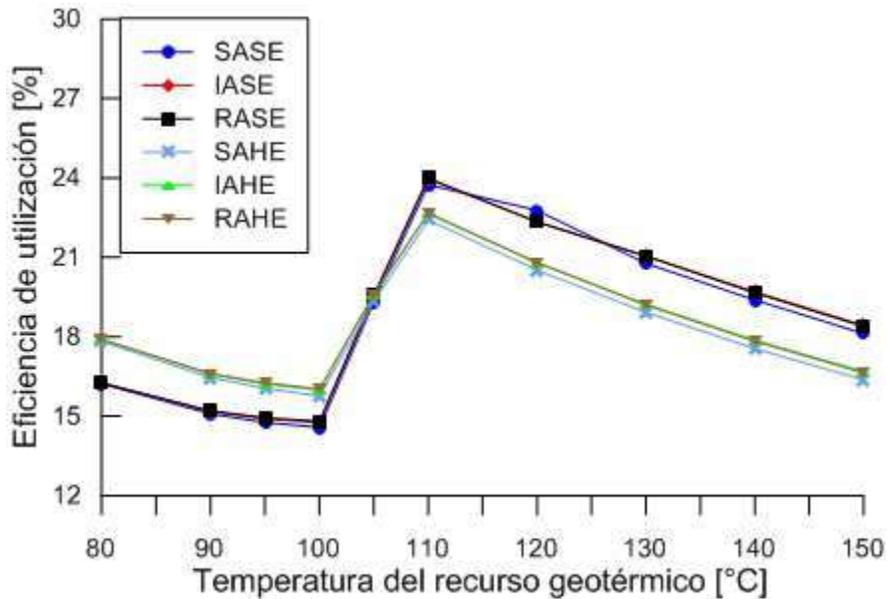


Figura 56. Eficiencia de utilización vs temperatura del recurso geotérmico.

La Figura 57 muestra los resultados a diversas temperaturas del recurso geotérmico para las diferentes alternativas tecnológicas que se muestran en la Tabla 14. Se puede observar que la alternativa IASE presenta un mejor desempeño en el rango de 110 °C a 150 °C, con la mayor eficiencia exergética de 52.9 % a una temperatura de 130 °C. Para temperaturas inferiores a 110 °C, la configuración con el mayor rendimiento es la RAHE. La Figura 57 también muestra que los sistemas que incluyen componentes de enfriamiento de medio efecto se ven menos afectados por las bajas temperaturas del recurso geotérmico.

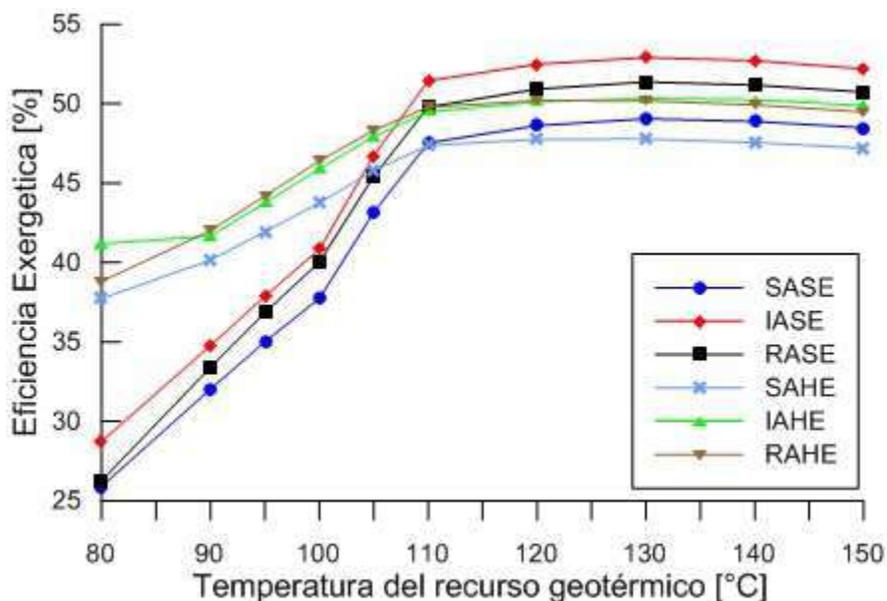


Figura 57. Eficiencia exergética vs temperatura del recurso geotérmico.

Finalmente, la Figura 58 muestra el comportamiento de los productos de los arreglos de poligeneración a diferentes temperaturas del recurso geotérmico. Cabe señalar que la producción de refrigeración permanece casi constante en todo el rango de temperatura para el sistema que utiliza máquinas de absorción amoníaco-agua de medio efecto. En el caso de las máquinas de absorción amoníaco-agua de simple efecto, hay un efecto notable a temperaturas de 100 °C a 150 °C, con una reducción de la capacidad de enfriamiento. Las configuraciones que producen más potencia neta a 150 °C son el IAHE y el IASE con 364.7 kW y 362.4 kW, respectivamente.

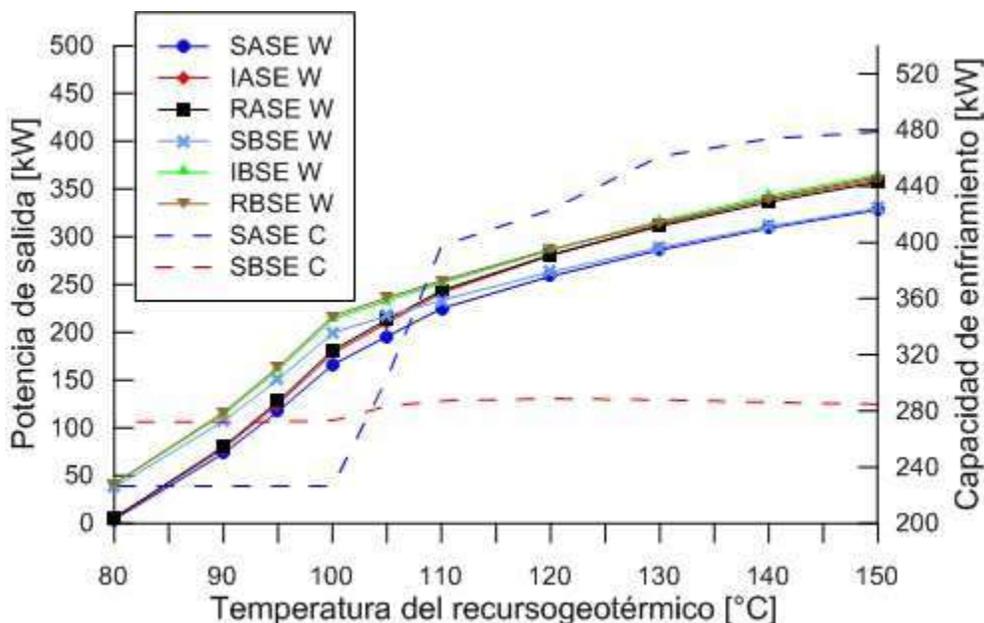


Figura 58. Productos vs temperatura del recurso geotérmico (refrigeración).

3.6 Conclusiones

En este capítulo se realizó un análisis energético y exergético para diversas disposiciones de un sistema de poligeneración que usan energía geotérmica de mediana y baja entalpía trabajando en cascada. De los resultados, se pueden enunciar las siguientes conclusiones:

- Entre todas las disposiciones analizadas, la configuración SC1 impulsada por una temperatura de 150 °C es la disposición con mayor eficiencia energética y exergética. Esta configuración también proporciona el mejor rendimiento con la mayor cantidad de potencia, refrigeración y uso directo de calor. Las configuraciones HPS2 y SC3 también tienen buen rendimiento energético y exergético, porque la energía geotérmica se utiliza en mayor proporción y con mayor eficacia. La analogía de los valores de la disposición SC3 con los de la SC1 pueden atribuirse a la disposición similar de los componentes accionados térmicamente y la mejor aprovechamiento del recurso geotérmico.
- Disposiciones en las que los subsistemas ORC y TAR se colocan en el primer nivel de la cascada, son los que tienen los más altos rendimientos energéticos y exergéticos. Arreglos que tienen estos componentes en el último nivel de la cascada, presentan los rendimientos más bajos tal es el caso de las disposiciones HPS1 y HPS3. Esto es debido a que los componentes tienen un menor rendimiento energético individual a bajas temperaturas, afectando en consecuencia el rendimiento energético global.
- De acuerdo los resultados de la destrucción de exergía, algunas mejoras potenciales de los subsistemas que integran las configuraciones estudiadas podrían ser identificados. Los componentes con más oportunidades de mejora son los subsistemas ORC y HX.
- Según los valores de destrucción de exergía obtenidos, existen posibilidades de mejoras termodinámicas en el evaporador, turbina y condensador del subsistema ORC, así como del evaporador del subsistema TAR y del intercambiador de calor HX. Sin embargo, todos los componentes de intercambio de calor son en los que más se debe poner atención para reducir la destrucción de exergía.
- Teniendo en cuenta que la mayoría de las irreversibilidades presentes son atribuidas a los procesos de transferencia de calor, una posible modificación para reducir la destrucción de exergía es aumentar la aproximación de temperatura del equipo de intercambio de calor. Esta reducción podría lograrse mediante un cambio en el diseño de los intercambiadores de calor, aumentando el área de transferencia de calor o haciendo uso de los arreglos de poligeneración con mejor distribución de temperatura y flujo.
- Con respecto al efecto de la temperatura de activación, por ejemplo, las diferentes temperaturas disponibles del recurso geotérmico, se notó que la disposición SC1 disminuía el rendimiento energético a temperaturas inferiores a 110 °C. Esto se atribuye al límite inferior de la temperatura de activación para el subsistema TAR, haciendo uso de una máquina TAR con menor COP. Los arreglos que presentaron menos variación en el rendimiento energético son el PC y el HPS2, porque el subsistema TAR se coloca en el primer nivel de energía, sin afectar a su rendimiento en este rango de temperatura baja.
- Es necesario encontrar aplicaciones y tecnologías que permitan aprovechar las bajas temperaturas del recurso geotérmico, aumentando niveles de aprovechamiento energético de los sistemas de poligeneración operando en cascada según el diagrama de Sankey mostrado en la Figura 45. Se puede observar que el 53.5% de la energía geotérmica disponible es comúnmente utilizada para la

reinyección, si se logra avanzar más en este campo se pueden tener más beneficios de los sistemas de poligeneración en cuestión de productos y mejorando el rendimiento global de los sistemas.

- Comparando los arreglos que utilizan TAR para usos de aire acondicionado, se encontró que los arreglos que presentaban mejores rendimientos, ventajas y productos fueron los arreglos basados en el ORC con IHE y el ORC regenerativo, trabajando en combinación con el subsistema de absorción de bromuro de litio de simple efecto, que son las alternativas IBSE y RBSE, respectivamente. Sin embargo, es necesario realizar un análisis económico para establecer que estos beneficios son válidos en términos de costos de energía.
- Teniendo en cuenta las disposiciones que utilizan TAR para usos de refrigeración (incluyendo la congelación), se encontró que los sistemas se comportan de manera diferente, porque no hay un arreglo específico que presente mejores resultados en términos de rendimiento en el rango de temperatura estudiado. Sin embargo, en el rango de temperatura de 110 °C a 150 °C, las disposiciones que exhibieron los mejores rendimientos, ventajas y productos generados fueron los basados en el ORC con IHE, trabajando en combinación con el subsistema de absorción Amoniaco-agua de simple efecto, es decir, la alternativa IASE. En el rango de 90 °C a 110 °C, el sistema que presentó el mejor desempeño fue la configuración basada en el ORC regenerativo que opera en combinación con el subsistema de absorción de medio efecto (RAHE).

Finalmente, se puede concluir que las tecnologías térmicas son adecuadas para la integración en todas las diferentes configuraciones propuestas para producir electricidad, frío y calor, y pueden verse como alternativas sostenibles para la utilización de energía geotérmica de mediana y baja entalpia. Este tipo de disposiciones de poligeneración presentan una amplia gama de formas flexibles de integración para aplicaciones específicas con necesidades particulares de energía, calor y otros productos no energéticos, lo que resulta en un mayor uso de la energía geotérmica.

Capítulo 4. Integración de plantas de poligeneración por selección de equipos

4.1 Introducción

Las fuentes de energía geotérmica se han convertido en una realidad como una alternativa al uso de recursos fósiles y para la reducción de los efectos adversos asociados. El desarrollo tecnológico y sostenible de este tipo de energía puede contribuir a aliviar la necesidad de energía del mundo. Uno de los caminos perseguidos es la mejora del rendimiento de los ciclos de trabajo y el aprovechamiento de fuentes de calor a baja temperatura. En esta situación el ORC (Ciclo Rankine Orgánico) es un sistema capaz de producir trabajo útil a partir de energías de baja temperatura. Con el objetivo de aumentar la eficiencia del sistema global y reducir los costos de inversión y operación, se propone el concepto de poli-generación. Un sistema de poli-generación en cascada podría combinar una central eléctrica, un sistema de suministro de agua fresca, una máquina de absorción para refrigeración y otros equipos para proporcionar el suministro de agua caliente doméstica, todo esto en combinación con una explotación en cascada del recurso geotérmico.

En este sentido, el ORC está emergiendo como un proceso prometedor para la conversión calor de baja y media temperatura. En los últimos años, las aplicaciones comerciales de esta tecnología, con rangos de potencia de 0.2 a 2 MW, se han disparado en todo el mundo. ORMAT, en los Estados Unidos y Turboden, en Europa, son las empresas más representativas que han desarrollado plantas, principalmente para el uso geotérmico. Sin embargo, los módulos de menor potencia se encuentran todavía en la fase de prototipo, debido a la falta de equipo adecuado (principalmente la turbina) y la dificultad de encontrar el fluido de trabajo más adecuado. Esto tiene una gran influencia en el diseño de cada proceso, porque, dependiendo de la aplicación, la fuente y el nivel de calor que se utilizarán, el líquido debe tener propiedades termodinámicas óptimas a temperaturas y presiones más bajas y deben satisfacer varios criterios, como ser económico, no tóxico, no inflamable, amigable con el medio ambiente, así como lograr una alta utilización de la disponibilidad energética de la fuente de calor, etc.

En la actualidad una opción para lograr una ventaja competitiva importante en el diseño e integración de las plantas de generación eléctrica ha sido considerar sistemas modulares estandarizados, los cuales han sido desarrollados con el objeto de cubrir las necesidades particulares más comunes de las diferentes tecnologías, bajo la premisa de la reducción de tiempos de fabricación y entrega de tales dispositivos, lo que reduce a su vez la construcción de las plantas. Al recoger la información a medida que se ejecuta la construcción de los sistemas requeridos, los conocimientos y la experiencia de la empresa se formalizan y nutren una base de datos que permitirá todo tipo de análisis y proyecciones para nuevos estudios. Por lo señalado anteriormente, es que muchas empresas han buscado nuevas herramientas tecnológicas para poder optimizar los procesos operativos internos, ahorrar costos y ser más eficientes, lo que les traería como consecuencia un mejor posicionamiento y la atracción o conservación de clientes. Convirtiéndose la integración de la información en un objetivo estratégico dentro de las mismas, ya que es imperante para la toma de decisiones y correcta ejecución de la producción y la consulta de datos en tiempo real.

Los módulos prefabricados de los sistemas ORC, TAR y HX utilizados para integrar las plantas

geotérmicas de poligeneración se utilizan también ampliamente para paquetes de instalaciones de petróleo y gas tanto de exploración y producción como refinerías y plantas petroquímicas. En este documento se contempla siempre el procedimiento de utilizar un diseño de paquete de procesos integrados, en el que tanto el equipo de procesos como el equipo de control, instrumentos y eléctrico sean instalados en bloque en una plataforma común.

A continuación se plantea un enfoque del diseño integrado para paquetes modulares de equipos de proceso. Mediante la incorporación de equipo eléctrico, de instrumentos y de control en la misma plataforma que el equipo de procesos, se logra un mayor nivel de integración. Las ventajas incluyen un número reducido de conexiones de equipos in situ y la capacidad de poner en marcha los equipos antes de la instalación, lo que se traduce en una reducción de los costos de instalación.

4.2 Procedimiento de evaluación tecno-económica

La metodología desarrollada en este análisis es la siguiente: Se realizó un estudio del sistema de poligeneración con el uso en cascada de la energía geotérmica con el fin de establecer las cantidades de producción con sus consumos energéticos. Se desarrolla la caracterización energética de la planta de poligeneración, realizando la cuantificación y distribución del consumo de energía eléctrica y térmica; y la identificación y cuantificación de las ineficiencias energéticas en los principales consumidores de energía eléctrica y térmica. Posteriormente, se presenta el procedimiento conducido para llevar a cabo la evaluación tecno-económica de la planta multi-producto con utilización en cascada de la energía geotérmica. Se muestra una descripción para el estudio del sistema en cascada, incluyendo las suposiciones y consideraciones principales. También se proporcionan características de las máquinas ORC, máquinas enfriadoras de absorción y dispositivos para usos directos que se pueden integrar en el sistema en cascada. Finalmente, se describen detalles sobre los modelos energético y económicos y su implementación.

4.2.1 Descripción del sistema de cascada

El sistema en cascada estudiado incluye tres niveles térmicos (con un componente principal o dispositivo por nivel), produciendo simultáneamente y secuencialmente, potencia, hielo para consumo humano y calor útil para un uso directo adicional. El componente del primer nivel es una máquina ORC con un enfriador de absorción para ser utilizado en el segundo nivel. Finalmente, un intercambiador de calor es el componente a ser incluido en el último nivel de la cascada geotérmica. La fuente de calor principal para el sistema considera la disponibilidad de recursos geotérmicos de baja y mediana temperatura. La Figura 59 muestra el concepto del sistema en cascada de tres niveles.

4.2.2 Suposiciones y consideraciones principales

Las suposiciones principales para cada nivel térmico que forman el sistema en cascada se dan a continuación:

Nivel térmico 1. Agua caliente geotérmica proveniente de un pozo geotérmico, proporciona calor al primer componente de la cascada, es decir, al ORC. La temperatura del agua caliente geotérmica disponible se considera en un rango de 80 a 130 °C, que representa la mayor parte de las manifestaciones térmicas de baja y mediana entalpia de los recursos geotérmicos de México [150]. La diferencia de temperaturas para el proceso de intercambio de calor dentro del evaporador del ORC se

considera según las condiciones de diseño de las máquinas ORC comercialmente disponible. Por lo tanto, la temperatura de salida disponible para operar el nivel térmico 2 dependerá de este valor.

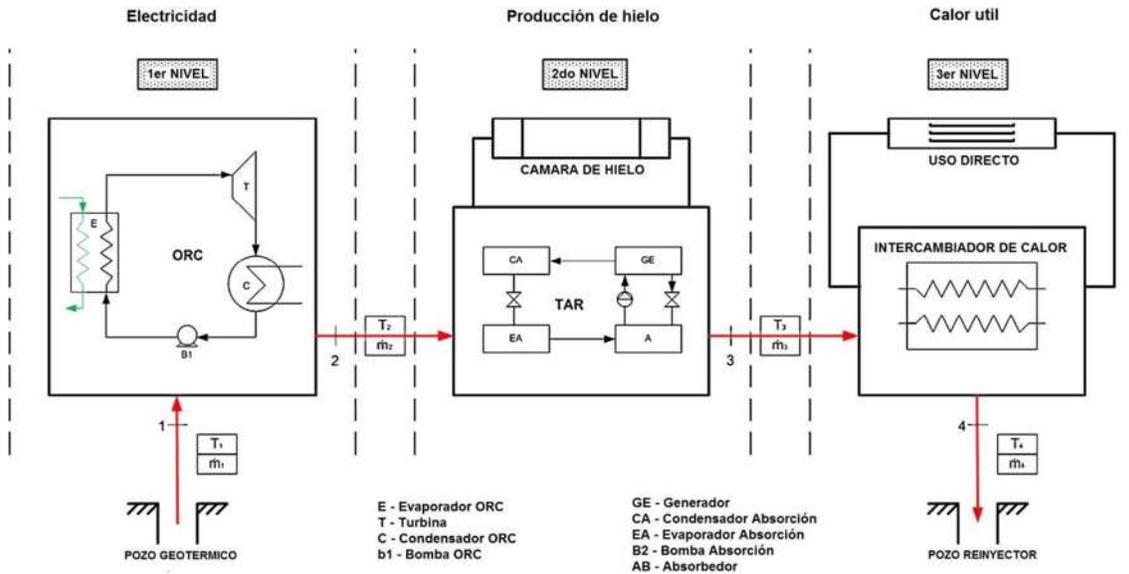


Figura 59. Esquema conceptual de un sistema en cascada de tres niveles.

Nivel térmico 2. Una vez que el agua caliente geotérmica sale de la máquina ORC en el nivel térmico 1, el agua geotérmica está lista para ingresar al segundo nivel térmico del sistema en cascada. En este segundo nivel, una máquina de refrigeración activada térmicamente (TAR) se coloca para producir hielo. Como este estudio considera la producción de hielo para el consumo humano, las máquinas que se incluirán son las que pueden enfriarse a 0 °C o menos. El agua caliente que sale del TAR tiene suficiente temperatura para alimentar el siguiente nivel de la cascada (entre 70 y 90 °C) dependiendo de la temperatura inicial del recurso geotérmico y la disminución de temperatura en el nivel térmico 1 y 2.

Nivel térmico 3. El último nivel de la cascada se forma una vez que el agua caliente sale del componente TAR. Como se espera que tenga una temperatura entre 70 y 90 °C, el agua caliente tiene el contenido de energía y temperatura suficiente para que coincida con una amplia variedad de usos directos geotérmicos. Para este nivel, el agua caliente proveniente del TAR se dirige a un intercambiador de calor con una efectividad térmica de 70 %. Finalmente, el agua caliente que sale del intercambiador de calor es reinyectada de nuevo al depósito geotérmico.

4.2.3 Principales componentes y características

Ciclo Rankine Orgánico. Muchos investigadores han estudiado el ORC como la opción principal para explotar, de forma sostenible, los recursos geotérmicos de baja y mediana temperatura para la generación de energía [151,121]. Este tipo de ciclos de potencia pueden operar en condiciones de diseño, con agua caliente a temperaturas superiores a 90 °C, incluso algunas máquinas ORC pueden operar a carga parcial con temperaturas tan bajas como 77 °C, proporcionando más flexibilidad para integrarse. Los fabricantes ofrecen pequeños sistemas de conversión de energía de tamaños estandarizados con salida de potencias nominales que van desde 10 a 1000 kW_e. Sin embargo, una diferencia notoria existe en la eficiencia térmica, la temperatura de activación y el costo capital, que

requiere una selección cuidadosa para una aplicación dada [141], el sistema en cascada de este estudio está destinado a aplicaciones pequeñas, limitando la salida de potencia del ORC hasta 300 kWe. Se condujo una búsqueda para identificar comercialmente fabricantes y máquinas de ORC disponibles. La Tabla 16 incluye máquinas ORC con diferentes salidas de potencia entre 11 y 280 kWe. La Tabla 16 incluye solo parámetros de entrada para conducir el análisis tecno-económico, como la potencia nominal, temperatura de activación, diferencia de temperatura en el evaporador, eficiencia térmica y costo capital (la marca comercial fue omitida, solo se incluyeron los modelos). Para identificar las maquinas de ORC para el procedimiento de selección, cada ORC fue designado con un código simple.

Vale la pena señalar que el objetivo de este análisis no es el diseño de unidades ORC, por lo tanto, aspectos tales como la selección óptima del fluido de trabajo, química de la salmuera, diseño de componentes individuales del ORC, etc., no fueron considerados. Como se mencionó anteriormente, solo se incluyeron unidades ORC de pequeña y mediana capacidad, porque para pequeñas aplicaciones es más fácil de alcanzar los requerimientos de calor de los otros componentes en los diferentes niveles térmicos [113].

Tabla 16: Máquinas ORC consideradas en el esquema de evaluación.

Código	Modelo	W _{ORC}	T _{ORC}	ΔT _{ORC}	η	I _{ORC}
		[kW]	[°C]	[°C]	[%]	[USD]
ORC01	IT10	11.0	95.0	25.1	6.1	52,356.38
ORC02	PMTH-25	25.0	95.0	7.0	7.8	99,983.62
ORC03	4200	35.0	104.0	25.9	7.0	247,263.00
ORC04	IT50	55.0	95.0	19.8	9.9	186,104.96
ORC05	4400	65.0	116.0	16.9	7.6	292,038.00
ORC06	IT100	109.9	95.0	19.9	9.9	321,113.32
ORC07	6500	110.0	116.0	14.6	8.5	409,159.00
ORC08	125XLT	125.0	95.0	16.3	8.9	355,399.84
ORC09	MT	125.0	121.0	21.2	9.1	355,399.84
ORC10	WHG 125	125.0	109.4	10.5	10.6	355,399.84
ORC11	OPB-150	155.0	135.0	21.2	9.1	496,930.00
ORC12	IT250	274.7	95.0	19.9	9.8	660,956.33
ORC13	280	280.0	91.0	16.3	8.9	655,000.00

Enfriadores de absorción. En cuanto a las máquinas activadas térmicamente, los componentes considerados fueron máquinas de absorción de simple efecto y medio efecto (o double lift) capaces de producir hielo y alcanzar una temperatura de -13 °C para el almacenamiento del hielo en cámaras frigoríficas. La temperatura de activación de esta tecnología depende principalmente del fluido de trabajo y número de efectos de absorción. Por lo general, cuanto mayor es el número de efectos, mayor será la temperatura de activación. De acuerdo con los niveles térmicos esperados definidos para el estudio, fueron consideradas dos tipos de máquinas:

- Enfriadores de absorción de simple efecto NH₃-H₂O con una temperatura de activación típica de 90 °C, un coeficiente de rendimiento (COP) de 0.6 y una diferencia de temperatura en el generador de 10 °C.

- Enfriadores de absorción de medio efecto NH₃-H₂O con una temperatura de activación típica de 80 °C, un COP nominal de 0.3 y una diferencia de temperatura en el generador de 10 °C.

Usos directos. Los usos directos de la energía geotérmica de baja y mediana temperatura en aplicaciones para los procesos de calentamiento y enfriamiento se ha reportado que proporcionan tres veces más ingresos que las aplicaciones individuales de potencia con energía geotérmica [152,153]. Hay una gran variedad de aplicaciones de uso directo con temperaturas que van desde 30 hasta 80 °C teniendo en común el uso de un intercambiador de calor. En este estudio, no se especifica un uso final determinado, pero la deshidratación de fruta o los invernaderos son buenos candidatos. Por simplicidad, un intercambiador de calor con una efectividad térmica del 70 % fue considerado en el último nivel térmico.

4.2.4 Modelado energético

Las ecuaciones para modelar los componentes principales del sistema de cascada geotérmica se basan en balances de masa, energía y en parámetros de conversión de energía, tales como la eficiencia energética, COP y efectividad térmica del ORC, TAR e intercambiadores de calor, respectivamente. En este análisis, una vez que la potencia nominal de la unidad ORC está preestablecida (de la Tabla 16), la tasa de calor de activación requerida por la unidad ORC para la producción de energía se puede obtener por medio de la Ecuación (4.1):

$$\dot{Q}_{ORC} = \frac{\dot{W}_E}{\eta_{ORC}} \quad (4.1)$$

El flujo másico de agua caliente geotérmica puede determinarse de acuerdo a:

$$\dot{m}_{Geo} = \frac{\dot{Q}_{ORC}}{c_{pw}(T_1 - T_2)} \quad (4.2)$$

La entrada de calor para la máquina de absorción puede determinarse utilizando el flujo másico del agua caliente geotérmica y la caída de temperatura en el generador de la máquina de absorción, por medio de la Ecuación (4.3):

$$\dot{Q}_{TAR} = \dot{m}_{Geo} \cdot c_{pw} \cdot (T_2 - T_3) \quad (4.3)$$

Como la capacidad de enfriamiento del componente TAR y el calor de entrada están relacionados a través del COP, el calor de enfriamiento puede ser determinado por la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{Cooling} = COP_{TAR} \cdot \dot{Q}_{TAR} \quad (4.4)$$

La carga $\dot{Q}_{Cooling}$ está direccionada a cubrir las cargas de la cámaras de hielo y refrigeración, \dot{Q}_{ICE} y \dot{Q}_{CC} , respectivamente. Un 50 % del total de la capacidad de enfriamiento ($\dot{Q}_{Cooling}$) fue asignada para la capacidad de almacenamiento de hielo (\dot{Q}_{CC}), se calculó la carga disponible restante para producir hielo por medio de la Ecuación (4.5). La cantidad de hielo producido fue entonces calculado por la Ecuación (3.6) y depende de la caída de temperatura para enfriar el agua fresca desde la temperatura ambiente (T_w) hasta la temperatura de congelación (T_{FR}), y desde la temperatura de congelación hasta la temperatura necesaria para almacenar el hielo producido. La Ecuación (4.6) incluye un factor f_{dt} , para considerar los tiempos muertos entre los ciclos de producción de hielo. Este factor refleja que el hielo se

produce en lotes y los tiempos de carga, enfriamiento, recolección y almacenamiento reducen la efectividad del tiempo de funcionamiento de la máquina de hielo [154]. En este análisis, una carga de 50 % de la capacidad de enfriamiento total se definió para \dot{Q}_{CC} . Fue considerado un valor de 0.5 para el tiempo muerto entre ciclos de producción de hielo.

$$\dot{Q}_{ICE} = \dot{Q}_{Cooling} - \dot{Q}_{CC} \quad (4.5)$$

$$\dot{m}_{ICE} = \frac{\dot{Q}_{ICE} \cdot f_{dt}}{Cp_w(T_w - T_{FR}) + C_{LAT} + Cp_{ICE}(T_{FR} - T_{ICE})} \quad (4.6)$$

Para el tercer nivel del sistema en cascada, el calor disponible para usos directos (\dot{Q}_{ADU}) y calor útil para aplicaciones de usos directos (\dot{Q}_{UDU}) fueron estimados por medio de las Ecuaciones (4.7) y (4.8). La diferencia de temperatura típica de intercambiadores de calor para la deshidratación, invernaderos u otros usos directos, están en el rango de 10 a 20 °C [155]. Basado en esto, se consideró un valor de 10 °C en el estudio.

$$\dot{Q}_{ADU} = \dot{m}_{Geo} \cdot Cp_w \cdot (T_3 - T_4) \quad (4.7)$$

$$\dot{Q}_{UDU} = \varepsilon_{UDU} \cdot \dot{Q}_{ADU} \quad (4.8)$$

Por lo tanto, considerando una temperatura inicial (T_1) del agua caliente geotérmica en el primer nivel del sistema en cascada y la temperatura (T_4) en el último nivel, la cantidad total de calor geotérmico en la entrada al sistema se puede estimar de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{Geo} = \dot{m}_{Geo} \cdot Cp_w \cdot (T_1 - T_4) \quad (4.9)$$

Finalmente, el rendimiento energético neto del sistema en cascada puede obtenerse considerando los tres productos del sistema en cascada (potencia, hielo y calor útil), así como la energía de entrada entregada para obtener estos tres productos, usando la Ecuación (4.10):

$$\eta_{Geo} = \frac{\dot{W}_E + \dot{Q}_{Cooling} + \dot{Q}_{UDU}}{\dot{Q}_{Geo}} \quad (4.10)$$

Modelado económico. Además, se desarrolló un modelo económico para determinar la rentabilidad del sistema de cascada geotérmica. Acoplado el modelo energético y económico, es posible estimar la viabilidad tecno-económica de todo el sistema. Hay varios indicadores económicos para estimar el comportamiento económico de un cierto proyecto de inversión, pero el indicador más utilizado es el Valor Actual Neto (VAN). Para determinar el VAN, es necesario estimar el costo capital, gastos, ingresos y costos de operación y mantenimiento (O & M). El costo capital representa el primer resultado relacionado con la adquisición, construcción, instalación y puesta en marcha del sistema. Para el sistema de cascada geotérmica estudiado aquí, tales gastos incluyen perforación, compra de componentes principales (ORC, TAR e intercambiador de calor), subsistemas, tuberías, etc.

El costo capital asociado a la perforación se puede estimar como función de profundidad de perforación con una expresión simple dada por la Ecuación (4.11) [156]. De acuerdo con estudios previos de varias

reservas geotérmicas mexicanas, agua caliente geotérmica a la temperatura asumida en este estudio, está disponible perforando a una profundidad en el rango entre 200 y 300 m [157]. Para este estudio, un pozo geotérmico con 300 m de profundidad fue considerado.

$$I_{WELL} = 2150 \left[\frac{\$}{m} \right] \cdot L_{WELL} \quad (4.11)$$

Para estimar el costo de inversión de las maquinas de ORC y de absorción, se recopiló información de diferentes fuentes sobre el costo de estos dos componentes. De la información recolectada, dos ecuaciones lineales en función de la potencia nominal de salida del ORC y la capacidad de refrigeración del TAR se obtuvieron por ajuste lineal de curvas; ver Ecs. (4.12) y (4.13), respectivamente:

$$I_{ORC} = 1229.8 \left[\frac{\$}{kW} \right] \cdot \dot{W}_E + 352327[\$] \quad (4.12)$$

$$I_{TAR} = 952.3 \left[\frac{\$}{kW} \right] \cdot \dot{Q}_{Cooling} + 159258[\$] \quad (4.13)$$

El costo capital total para el sistema en cascada se obtuvo como la suma del costo capital individual del pozo geotérmico, del ORC y del TAR, así como otros costos adicionales relacionados con la compra de intercambiadores de calor y otros subsistemas. Basado en otros casos reportados, se asumió un 25 % más del costo capital para cubrir los subsistemas adicionales [157]. Por lo tanto, el costo total de inversión del sistema de cascada geotérmica está dado por:

$$I_{TOT} = (I_{WELL} + I_{ORC} + I_{TAR}) \quad (4.14)$$

La inversión total debe estar anualizada, incluyendo la vida útil esperada del sistema y la tasa de interés a tener en cuenta del valor del dinero en el tiempo. El costo de inversión anual se puede obtener usando Ec. (4.15). Para este estudio, se consideraron una tasa de interés del 10 % y una vida de 20 años.

$$I_{ANUAL} = I_{TOT} \left[\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (4.15)$$

Los productos del sistema en cascada geotérmica representan una oportunidad de obtener ganancias económicas. Es posible tener ingresos desde el comercio de la potencia eléctrica, vendiendo el hielo y la energía térmica. Con el fin de estimar estos ingresos, ya que el análisis económico se realizó sobre una base anual, es necesario determinar las cantidades de energía eléctrica, hielo y energía térmica producida y sus ingresos correspondientes.

La electricidad anual total generada se estimó utilizando la ecuación (4.16). Se asumió un factor de disponibilidad del equipo de 85 %, dando 7446 horas de tiempo de funcionamiento efectivo (t_{op}) durante todo el año. Los ingresos esperados del comercio de electricidad se calcularon utilizando la ecuación (4.17) Dado que en México no está permitido vender electricidad directamente y solo se permite el comercio interno entre las industrias a través de un acuerdo de asociación, se asumió un intercambio de electricidad a precio de 0.08 USD por kWh (UC_{EL}).

$$EW_{ANUAL} = \dot{W}_E \cdot t_{op} \quad (4.16)$$

$$IN_{EL} = UC_{EL} \cdot EW_{ANUAL} \quad (4.17)$$

Teniendo la cantidad de hielo producida anualmente, estimada a partir de Ec. (4.6), los ingresos previstos de la venta de hielo se pueden calcular usando Ec. (4.18) De acuerdo con el mercado mexicano, se espera un ingreso de 0.15 USD por kilogramo de hielo (UC_{ICE}). En el modelo económico, también debe considerarse el gasto anual para comprar agua potable para producir el hielo, tal gasto puede ser calculado por medio de Ec (4.19).

$$IN_{EL} = UC_{EL} \cdot \dot{M}_{ICE,ANUAL} \quad (4.18)$$

$$EG_{H2O} = UC_{H2O} \left(\frac{\dot{M}_{ICE} \cdot t_{op}}{\rho_{ICE}} \right) \quad (4.19)$$

La energía térmica anual total para uso directo y los ingresos esperados por vender esta energía se pueden estimar usando las Ecs. (4.20) y (4.21), respectivamente. En este estudio, se asumió un ingreso de 0.0160 USD por kWh (UC_{HW}) para el producto de uso directo. Con este precio se supuso que la energía producida era equivalente a la energía térmica producida en una caldera convencional que quema gas natural.

$$EQ_{UDU,ANUAL} = \dot{Q}_{UDU} \cdot t_{op} \quad (4.20)$$

$$IN_{QUUDU} = UC_{HW} \cdot EQ_{UDU,ANUAL} \quad (4.21)$$

El flujo de efectivo se calcula a partir de los ingresos proyectados de los productos obtenido del sistema en cascada y los gastos para costos capitales, costos de operación y mantenimiento y agua comprada para la producción de hielo, dada por la Ec. (4.22):

$$CF = (IN_{EL} + IN_{ICE} + IN_{QUUDU}) - (I_{Anual} + C_{OM} + EG_{H2O}) \quad (4.22)$$

Para completar el modelo económico, el valor actual neto (VAN) que proporciona una estimación de la viabilidad económica del sistema de cascada geotérmica, se calculó resolviendo Ec. (4.23),

$$VAN = CF \left[\frac{(1+i)^N - 1}{i \cdot (1+i)^N} \right] - I_{TOT} \quad (4.23)$$

El procedimiento utilizado para llevar a cabo la evaluación tecno-económica del sistema en cascada geotérmico y la selección de la máquina ORC más factible entre todos los candidatos ORC tal como el enfriador de absorción, fue formulado como un simple problema de optimización donde dos expresiones fueron separadamente consideradas como funciones objetivo. Una función está relacionada con el rendimiento energético del sistema, a través de la eficiencia de energía total dada por la ecuación (4.0). Esta función debe ser maximizada. La otra función objetivo está relacionada con un parámetro económico, en este caso es el VAN dado por la Ec. (4.23) Esta otra función necesita ser maximizada también. En ambos casos, la variable de decisión se relacionó con la producción de potencia nominal de las máquinas ORC enumeradas en la Tabla 16.

Restricciones de igualdad fueron introducidas por las ecuaciones en las secciones del modelo energético y del modelo económico, a excepción de la eficiencia energética global y el VAN, que anteriormente fueron definidas como funciones objetivo. Para la implementación del modelo, fue necesario considerar una variable binaria ($y = 1, 0$) para incluir solo una máquina ORC en el sistema en cascada. Por lo tanto, una restricción de igualdad se empleó para definir la potencia nominal del ORC, donde "i" significa todas las unidades ORC incluidas en la Tabla 16 y se ejecuta de $i=1$ a $i=13$:

$$\dot{W}_E = \sum_{i=1}^{13} \dot{W}_{ORC}(i) \cdot y(i) \quad (4.24)$$

Las siguientes restricciones están relacionadas con la temperatura de entrada de agua caliente geotérmica, la diferencia de temperatura del evaporador y la eficiencia energética de cada máquina ORC incluida en la Tabla 16:

$$T_1 = \sum_{i=1}^{13} T_{ORC}(i) \cdot y(i) \quad (4.25)$$

$$\Delta T = \sum_{i=1}^{13} \Delta T_{ORC}(i) \cdot y(i) \quad (4.26)$$

$$\eta_{ORC} = \sum_{i=1}^{13} \eta_{ORC}(i) \cdot y(i) \quad (4.27)$$

Para asegurar que solo haya una unidad ORC presente en el sistema en cascada, la siguiente restricción se incluyó en el algoritmo de optimización:

$$\sum_{i=1}^{13} y(i) = 1 \quad (4.28)$$

Finalmente, dos restricciones más de desigualdad para las máquinas activadas térmicamente fueron consideradas. La primera restricción define el mínimo requisito de temperatura de la máquina de absorción de medio efecto y asigna un COP de 0.3. La segunda restricción funciona en un modo similar para la asignación de máquina de absorción de simple efecto una COP de 0.6. Ver Ecs. (4.29) y (4.30), respectivamente.

$$T_2 \geq 80 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ y } COP = 0.3 \quad (4.29)$$

$$T_2 \geq 90 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ y } COP = 0.6 \quad (4.30)$$

La descripción matemática del modelo de energía y economía se clasifica como una programación no lineal de enteros mixtos (MINLP), con la salida de potencia nominal ORC asociada a otros parámetros enumerados en la Tabla 16, así como la variable binaria $y(i)$ vistos como las variables de decisión. Por lo tanto, todas las ecuaciones enumeradas anteriormente fueron implementados como un modelo de MINLP en el entorno del software GAMS usando DICOPT como el solucionador de NLP y BARON como el solucionador de MINLP [158]. Una vez que el modelo fue implementado, fue resuelto en una computadora con plataforma Windows.

4.3 Resultados y discusión

El objetivo principal de este trabajo fue la evaluación y selección de maquinas ORC de pequeña capacidad y unidades de absorción para ser utilizados en una forma de cascada, teniendo en cuenta las

condiciones del fluido geotérmico típico de diferentes zonas en México. El enfoque propuesto permitió la determinación de condiciones óptimas de diseño bajo especificación de unidades ORC disponibles de diferentes fabricantes como se ilustra en la Tabla 16. El modelo de optimización convergió a una solución única donde las dos funciones objetivas propuestas se maximizan por separado. Una discusión de los resultados se da a continuación.

Al resolver el modelo de optimización, el ORC apropiado y las unidades de enfriamiento de absorción fueron seleccionadas alcanzando un valor máximo de la eficiencia energética global y el beneficio económico. La Tabla 17 muestra los resultados energéticos y económicos para el sistema de cascada optimizado. La primera y la segunda columna de la Tabla 17, presentan los resultados para la configuración óptima con el VAN y la eficiencia energética global como las funciones objetivo, respectivamente. Puede observarse que ambas funciones objetivo alcanzan los mismos valores máximos con alrededor de \$10.738 millones para el VAN y 46.3 % para la eficiencia energética global (véanse los valores en negrita en la Tabla 17). Los valores óptimos corresponden a la máquina de potencia codificada como ORC10 (variable binaria $y(10)=1$), con una potencia nominal de salida de 125 kW_e acoplada a una máquina de absorción de simple efecto, operando con agua caliente geotérmica a una temperatura alrededor de 110 °C. El Período de Retorno Simple (PRS) también se calculó, obteniendo un valor de 1.7 años para ambas configuraciones. Debe considerarse que como las funciones objetivo no están en conflicto y ambas alcanzaron las mismas cifras óptimas, el intento de implementar una optimización multi-objetivo no se realizó en esta etapa.

Tabla 17: Resultados de energía y económicos para el sistema geotérmico en cascada optimizado.

Parámetro	Unidad	T ₂ ≥ 90 °C (COP=0.6)		T ₂ ≥ 80 °C (COP=0.3)	
		max VAN Y(10)=1	max ETA Y(2)=1	max VAN Y(10)=1	max ETA Y(10)=1
VAN	[MUSD]	5.202	1.3326	10.738	10.738
η _{GEO}	[%]	36.4	39.1	46.3	46.3
W _{E,ORC}	[kWe]	125.0	25.0	125.0	125.0
ΔT _{ORC}	[°C]	10.5	7.0	10.5	10.5
η _{ORC}	[-]	10.6	7.8	10.6	10.6
T ₁	[°C]	109.40	95.00	109.40	109.40
T ₂	[°C]	98.90	88.00	98.90	98.90
T ₃	[°C]	88.90	78.00	88.90	88.90
T ₄	[°C]	78.90	68.00	78.90	78.90
Q _{ORC}	[kW]	1,179.24	320.51	1,179.24	1,179.24
M _{GEO}	[kg/s]	26.868	10.954	26.868	26.868
Q _{TAT}	[kW]	1,123.09	457.87	1,123.09	1,123.09
Q _{Cooling}	[kW]	336.92	137.36	673.85	673.85
M _{ICE}	[kg/h]	15.542	6.336	31.084	31.084
Q _{DU}	[kW]	786.16	320.51	786.16	786.16
Q _{GEO}	[kW]	3,425.42	1,236.26	3,425.42	3,425.42
EW _{ANNUAL}	[MWh]	930.70	186.10	930.70	930.70
EQDU _{ANNUAL}	[MWh]	5,853.80	2,386.50	5,853.80	5,853.80
I _{TOT}	[MUSD]	1.8506	1.2938	2.2517	2.2517
I _{ANNUAL}	[MUSD]	0.2173	0.1519	0.2644	0.2644
I _{NEL}	[USD]	74,460.00	14,892.00	74,460.00	74,460.00
I _{NICE}	[MUSD]	0.7232	0.29488	0.1446	0.1446
I _{NQDU}	[USD]	93,660.37	38,184.61	93,660.37	93,660.37
EG _{H2O}	[USD]	15,723.79	6,410.46	31,447.58	31,447.58
C _{OM}	[USD]	21,737.57	15,197.10	26,448.52	26,448.52

CF	[MUSD]	0.6365	0.17438	1.2923	1.2923
PRS	Años	2.907	7.420	1.742	1.742

Como la máquina de absorción de medio efecto no parecía tan buen candidato en el sistema óptimo de cascada geotérmica, se realizaron cálculos suponiendo que solo esta máquina de enfriamiento estaba disponible. Este cálculo se realizó para investigar cualquier otro arreglo, eliminando la restricción de desigualdad dada por la Ecuación. (4.30) del modelo de optimización. Las columnas tercera y cuarta de la Tabla 17 contienen resultados para el caso donde solo la máquina de absorción de medio efecto fue incluida. La tercera columna corresponde al valor máximo de VAN y la cuarta columna corresponde al valor máximo de eficiencia energética global, respectivamente. Eso se puede ver desde la tercera columna, que se alcanzaron valores de alrededor de \$ 5.202 millones de dólares, maximizando el VAN. El VAN máximo corresponde por segunda vez al ORC10, una maquina de absorción de medio efecto y calor útil para su uso posterior. Un periodo de recuperación simple de 2.9 años y la eficiencia energética global del 36.4 % logrado para este caso. La cuarta columna muestra los resultados para la eficiencia energética global como función objetivo, logrando un valor máximo de 39.1 %. El valor del VAN es de \$ 1.3326 millones de dólares con un periodo de amortización de 7.42 años. Esta disposición corresponde a la variable binaria $y(2)=1$, que es el modelo ORC02 PMTH-25, con 25 kW_e de salida de potencia nominal, junto con una máquina activada térmicamente de medio efecto

Un aspecto interesante a tener en cuenta en los cuatro casos que se muestran en la Tabla 17, es que la eficiencia energética del ORC y el costo capital parecen no ser solo los parámetros importantes que influyen en la correcta integración de un ORC con los otros niveles térmicos. Se puede ver, comparando los valores de temperatura de la Tabla 17 y las características del ORC enumeradas en la Tabla 16, la diferencia de temperatura en el evaporador del ORC también juega un papel importante. Los dos ORC seleccionados como óptimos, corresponden a unidades con la diferencia de temperatura más baja entre la entrada y la salida del evaporador, 10.5 °C para el ORC10 y 7.0 °C para el ORC02. Esto significa que hay más energía térmica disponible para el próximo nivel térmico de la cascada geotérmica y se puede esperarse mayor rentabilidad. Sin embargo, para obtener cualquier posible relación entre todos los parámetros enumerados en la Tabla 16, así como para determinar el comportamiento general, el modelo de optimización se resolvió excluyendo las soluciones optimizadas anteriores en cada ejecución subsiguiente hasta llegar al peor de los casos. Siguiendo esto procedimiento, se obtuvieron las Figuras. 60-62.

La Figura 60 muestra el rendimiento del VAN para todos los ORC enumerados en la Tabla 16. Las barras rojas corresponden a los sistemas geotérmicos en cascada usando máquinas de absorción de simple efecto y las barras azules corresponden a los que usan enfriadores de absorción de medio efecto. Se puede ver que todas las configuraciones tienen un valor positivo del VAN, lo que indica la viabilidad económica de cada configuración. Evidentemente, el ORC10 con unidad de absorción de simple efecto es la configuración más competitiva. Estos resultados resaltan el hecho de que el concepto de utilización en cascada supera la desventaja de la baja eficiencia y el alto costo capital del ORC. Por otro lado, se puede observar que el VAN disminuye a medida que aumenta la caída de temperatura en el evaporador, es decir, los valores más altos de VAN son para unidades con menor caída de temperatura en el evaporador. Este resultado confirma que la mayoría de las unidades apropiadas son las que tienen menor caída de temperatura en el evaporador. Además, baja eficiencia térmica del ORC se compensa con más energía térmica disponible para alimentar el siguiente nivel de cascada mientras produce mayor beneficio.

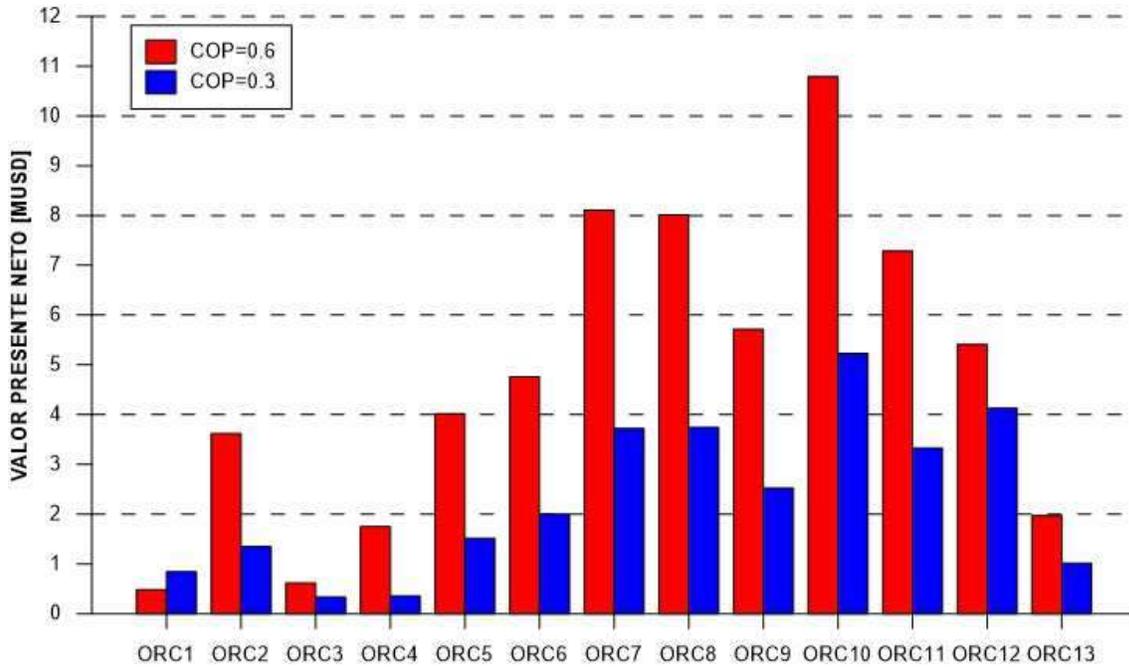


Figura 60. VAN del sistema en cascada para diferentes ORC's.

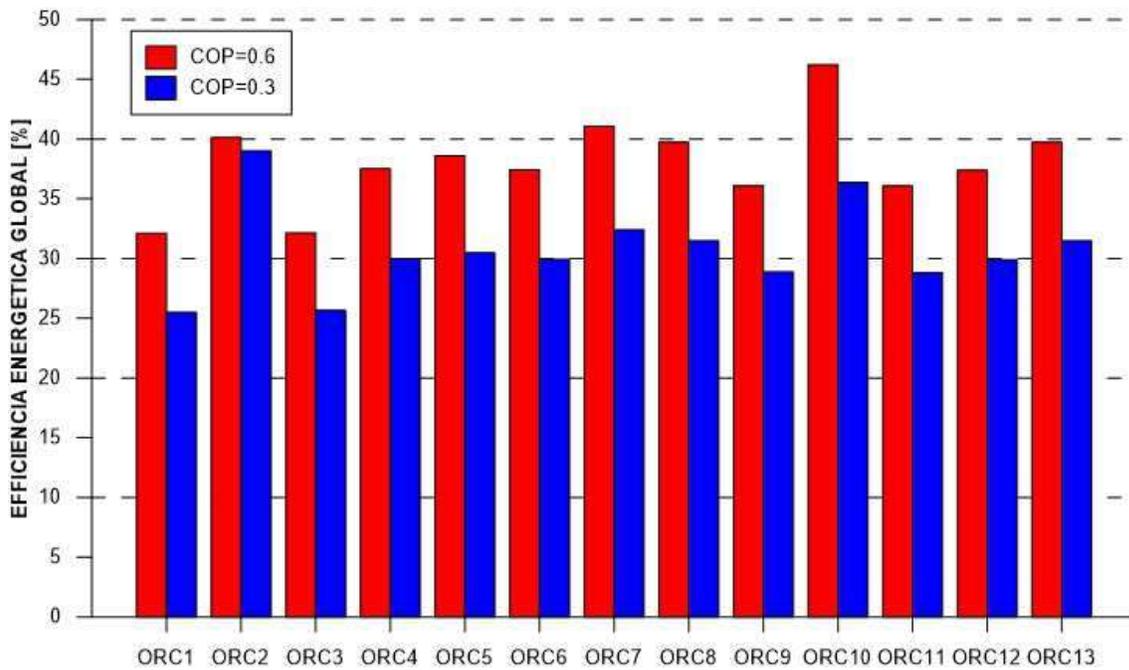


Figura 61. Eficiencia térmica global del sistema en cascada para diferentes ORC's.

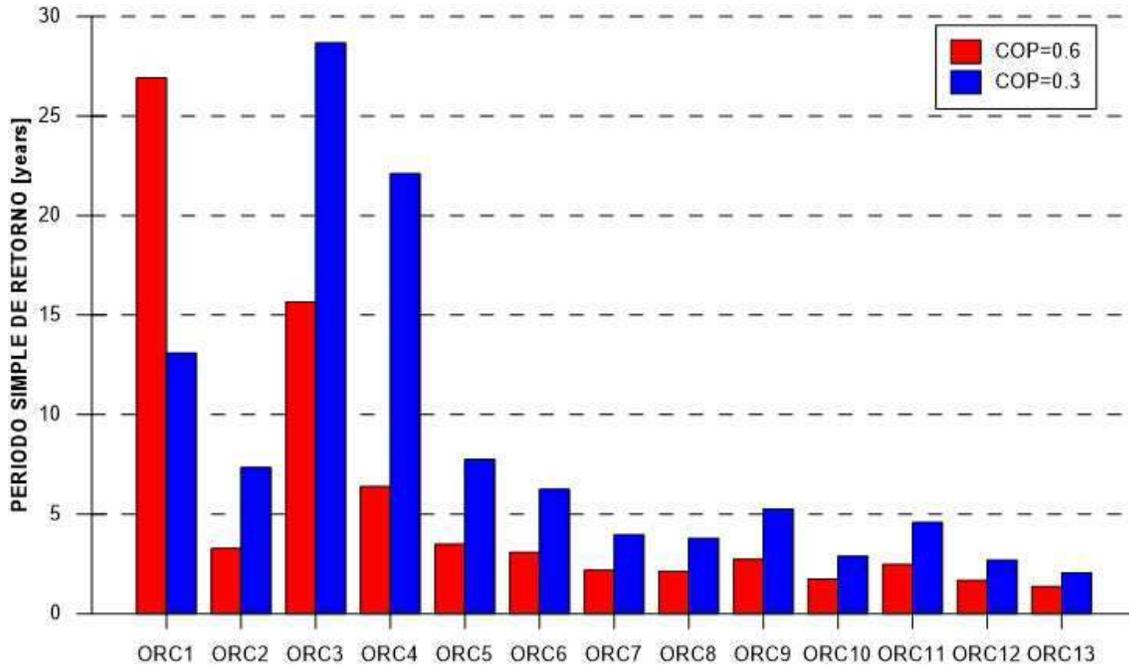


Figura 62. Periodo simple de retorno del sistema en cascada para diferentes ORC's.

El rendimiento energético global se muestra en la Figura 61, las barras rojas corresponden a máquinas de absorción de simple efecto y las barras azules corresponden a unidades de medio-efecto. Se puede observar que los sistemas con mejor eficiencia energética global son los sistemas que incluyen máquinas de simple efecto. Sin embargo, los sistemas que incluyen unidades de medio efecto también son atractivos desde el punto de vista energético. Las configuraciones con el mayor rendimiento energético son los que tienen la mayor eficiencia energética de ORC y menor caída de temperatura en el evaporador y viceversa.

Finalmente, en la Figura 62 se incluye el Periodo de Retorno Simple calculado para cada configuración. En este caso, el ORC13 es el sistema que tiene el período de retorno simple más bajo. Sin embargo, a pesar de esta alternativa parece factible desde el punto de vista del PRS, es más deseable considerar el valor del VAN para determinar la viabilidad económica de esta opción. En este caso, no se encontró una relación clara entre los parámetros enumerados en la Tabla 16.

4.4 Conclusiones

En este capítulo se presenta un procedimiento para la selección de ORC y máquinas de absorción de pequeña capacidad para integrarse en una planta de poligeneración usando energía geotérmica en forma de cascada. Un sistema de cascada simple que consta de tres niveles térmicos que funcionan secuencialmente y produciendo simultáneamente, potencia, hielo y calor útil fue propuesto y evaluado. Un análisis tecno-económico se llevó a cabo para evaluar el rendimiento del sistema con diferentes máquinas ORC desde el punto de vista energético y económico. los problemas de seleccionar el ORC más apropiado, entre diferentes opciones disponibles en el mercado, se redujo a través de un simple algoritmo de optimización que incluye variables binarias, así como VAN y la eficiencia energética general como funciones objetivo. Se demostró que ORC es una tecnología prometedora, a pesar de la baja eficiencia que este tipo de máquinas presenta. Este aparente inconveniente fue superado mediante

el uso de energía térmica en diferentes niveles, aumentando la eficiencia energética general de todo el proceso.

El concepto de cascada también aumentó la rentabilidad del sistema debido a los productos adicionales obtenidos en los niveles posteriores. El esquema multi-producto mejora el uso racional de la energía geotérmica y mejora el rendimiento económico de estos nuevos esquemas, que generalmente son castigados por altos costos de inversión. Particularmente, se encontró que la eficiencia energética del ORC y el costo capital no son los únicos parámetros importantes que influyen en la economía y el rendimiento energético de los sistemas en cascada geotérmica, la diferencia de temperatura en el evaporador del ORC es un factor importante.

Se puede concluir que la mayoría de las unidades ORC apropiadas son las que tienen una caída de temperatura más baja en el evaporador, logrando valores mayores de VAN. Además, la baja eficiencia térmica del ORC no es una desventaja porque se compensa con más energía térmica disponible para alimentar el siguiente nivel y obtener mayores ganancias. Respecto al uso racional de la energía, configuraciones con mayor rendimiento energético son los que tienen una mayor eficiencia energética ORC y menor caída de temperatura en el evaporador.

Capítulo 5. Integración de la planta de poligeneración por diseño de equipos.

5.1 Introducción

La integración de la planta de poligeneración por diseño de equipos consiste en el cálculo de los ciclos termodinámicos para posteriormente realizar la selección adecuada de las condiciones de operación óptimas y los dispositivos más eficientes para cada uno de los subsistemas. Este tipo de plantas son elegidas por que cuentan con las características necesarias para alcanzar un uso más efectivo de los recursos geotérmicos de mediana y baja entalpia. Esto es debido a que los fluidos geotérmicos aprovechados en dichos dispositivos tienen propiedades físicas tales como la temperatura, presión, presencia de gases no condensables, sólidos disueltos, pH, potencial de corrosión. Este sistema de conversión de energía se puede adaptar a tales condiciones particulares. Este sistema consiste en un subsistema basado en un Ciclo Rankine Orgánico (ORC), un subsistema de enfriamiento basado en máquinas de absorción (TAR) y un sistema de deshidratación de jitomate. En este capítulo, se agrega la implementación del modelo detallado de torres de enfriamiento húmedas y su configuración, esta implementación está considerada en la optimización del sistema. Las tecnologías ORC tienen una amplia gama de fluidos de trabajo disponible y configuraciones del ciclo, lo que implica tener buenos criterios para la selección de los fluidos y de los parámetros del ciclo para la explotación de la fuente de calor determinada.

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, actualmente existe una necesidad global del uso eficiente de la energía. Para hacer frente a los retos antes mencionados el propósito de este capítulo es dar una guía en la planificación y el diseño de sistemas de energía geotérmica de mediana y baja entalpia a diferentes niveles mediante el desarrollo de un marco de modelado y optimización que se pueda implementar. La demostración de la capacidad de este marco a través de sus aplicaciones a sistemas de energía de poligeneración con el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpia, que son un tipo de sistemas de energía de generación con un gran potencial para hacer frente a los problemas energéticos y ambientales, especialmente en el corto y mediano plazo.

Uno de los objetivos de este capítulo es presentar una evaluación termodinámica y optimización del sistema de poligeneración mediante el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpia basado en diferentes configuraciones de la planta y de los ciclos que la integran. Los principales objetivos son identificar los fluidos adecuados a través de los cuales la electricidad y el frío pueden ser generados con alta eficiencia; así como las condiciones apropiadas del uso directo del calor para el sistema; encontrar las mejores configuraciones para los ciclos que integran el sistema y hacer una optimización técnico-económica del sistema para obtener el mejor costo-beneficio. Un análisis termodinámico detallado se realiza en el entorno del software EES® teniendo en cuenta las fuentes geotérmicas en el intervalo de temperaturas anteriormente mencionado. Todos los datos y supuestos para el cálculo del rendimiento de los componentes de la planta se establecen de acuerdo a la información proporcionada por los fabricantes, sistemas que están en funcionamiento y en la literatura técnica disponible. Otro objetivo es dar una idea de los sistemas de poligeneración con el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpia desde un punto de vista económico. Los procesos de adopción y difusión de tecnologías innovadoras están fuertemente influenciados por

factores económicos. Todavía no hay mucha información publicada sobre los costos reales de los sistemas aplicados a los sistemas de poligeneración con el uso de la energía geotérmica de mediana y baja entalpía. Se implementó un modelo económico para la optimización del código desarrollado previamente.

Para la optimización multi-objetivo se eligen la eficiencia exergética como función de rendimiento y dos funciones objetivo económicas. La primera es el Valor Actual Neto (VAN) de la planta de poligeneración, mientras que la segunda es la minimización del costo de inversión. Este código desarrollado permite un amplio análisis tecno-económico de las diferentes configuraciones y arreglos de los ciclos que integran la planta. A través de una rutina de optimización, la configuración de los ciclos y los fluidos conduce a un mejor costo de la planta para cada temperatura considerada de la fuente geotérmica. Los resultados técnico-económicos que se muestran permiten definir algunas consideraciones generales importantes para la selección de la combinación óptima de los fluidos de trabajo y configuración para el diseño de la planta de poligeneración. Los resultados confirman un amplio rango de precisión. En lugar de considerar los resultados como exactos, las estimaciones se podrían considerar para proporcionar una guía al comparar varias alternativas, estimadas con el mismo método.

5.2 Revisión de la literatura

Para realizar la optimización multi-objetivo, primero revisamos los trabajos de optimización relacionados con los sistemas de poligeneración y los subsistemas que lo componen. Havelský descubrió que los sistemas de cogeneración de calor, producción de frío y electricidad muestran un gran potencial de ahorro de energía [159]. De acuerdo con la clasificación para la generación de electricidad que utiliza fuentes de calor a baja temperatura [160], el Ciclo de Rankine Orgánico (ORC) y el Ciclo de Kalina (KC) son buenas opciones para implementarse en sistemas de generación de energía geotérmica y, por lo tanto, en sistemas de poli-generación con el aprovechamiento en cascada de la energía geotérmica mediana y baja entalpía. Los beneficios de usar un subsistema ORC son: bajo mantenimiento, operación autónoma, presiones de trabajo favorables y la oportunidad de usar calor de temperatura mediana y baja. Los sistemas de ORC se han desarrollado durante mucho tiempo y el fluido de trabajo generalmente se selecciona en función de la temperatura de la fuente de calor [161, 162]. Recientemente se ha publicado una gran cantidad de estudios científicos para la selección de fluidos de trabajo y la optimización de los parámetros correspondientes de las fuentes geotérmicas del ciclo [163-170]. Métodos de predicción teórica para definir el fluido de trabajo óptimo [171]. Otros análisis se han centrado en la optimización del rendimiento del ciclo ORC. Wei et al. [172] realizó un análisis de rendimiento y optimización de un sistema ORC utilizando R245fa como fluido de trabajo y utilizando calor residual. Dai et al. [173] optimizó termodinámicamente un ORC utilizando diferentes fluidos de trabajo con eficiencia exergética como función objetivo mediante un algoritmo genético. Schuster et al. [174] presentaron el potencial de optimización de ORC a través de parámetros supercríticos. Se consideraron y compararon varios fluidos de trabajo en relación con su eficiencia térmica y el porcentaje de calor útil para optimizar el rendimiento. Sun et al. [175] propusieron un algoritmo de optimización que combina un conjunto óptimo de variables operativas para maximizar la generación de energía neta o la eficiencia térmica.

Las investigaciones mencionadas anteriormente se centran principalmente en optimizar la eficiencia termodinámica, y el factor económico debe considerarse en la optimización de los sistemas. Arslan y Yetik [176] optimizaron la planta de energía geotérmica ORC binaria supercrítica en la región de Simav utilizando *Artificial Neural Network*. Encontraron los modelos de ARN más adecuados integrados con el

concepto de costo del ciclo de vida utilizado para determinar el diseño óptimo del sistema. Además, se han realizado varios estudios con respecto a la optimización del rendimiento de ORC considerando tanto los factores termodinámicos como económicos. Cayer et al. [177] llevaron a cabo una optimización paramétrica de un ciclo ORC transcrito utilizando seis criterios de rendimiento, tales como eficiencia térmica, generación específica neta, eficiencia de segunda ley, UA global, superficie de los intercambiadores de calor y el costo relativo del sistema. Descubrieron que es imposible obtener simultáneamente los seis criterios para un rendimiento óptimo con los mismos parámetros independientes. Quoilin et al. [178] llevó a cabo la optimización termodinámica y económica de un ORC, respectivamente, en la implementación de la recuperación de calor residual. Encontraron que el punto de operación para la potencia máxima no corresponde al costo mínimo específico de inversión. Zhang et al. realizaron una optimización paramétrica y comparación del rendimiento del ciclo de potencia ORC subcrítico y transcrito en un sistema de energía geotérmica binario de baja temperatura con eficiencia térmica, eficiencia exergética, eficiencia de recuperación, área de intercambio de calor por unidad de energía producida y el costo de energía como indicadores de rendimiento bajo condiciones dadas de la fuente y del sumidero de calor [143]. Wang et al. [179] examinaron los efectos de los parámetros de diseño termodinámico fundamentales, que incluyen la presión y temperatura de entrada a la turbina, la diferencia de temperatura de compresión, la diferencia de temperaturas de aproximación en el HRVG, la potencia de salida y las áreas de transferencia de calor del HRVG y el condensador. La relación de potencia neta entre el área de transferencia de calor total se selecciona como criterio de evaluación de desempeño para predecir el desempeño del sistema desde el punto de vista termodinámico y económico a través de un algoritmo genético. Lecompte et al. [180] desarrollaron una metodología de diseño termo-económico para un Ciclo Rankine Orgánico (ORC) basado en el costo de inversión específico (SIC), teniendo en cuenta la evolución de las condiciones de operación y bajo carga parcial. La utilidad del modelo se ilustra mediante la aplicación a un sistema CHP real.

Aunque se han publicado múltiples estudios con respecto a la optimización de ORC con diferentes criterios de parámetros de rendimiento, incluidos los indicadores termodinámicos y económicos, pocos estudios han investigado el diseño óptimo teniendo en cuenta el factor de forma económica y termodinámica simultánea. Al-Sulaiman et al. [181,182] usaron un Ciclo Rankine Orgánico para tres nuevos sistemas de tri-generación. Hicieron la optimización termo-económica del sistema por costo de exergía específica. El método de Powell se empleó para minimizar el costo combinado del producto de la tri-generación (refrigeración, calefacción y energía). Wang et al. [183] basándose en los parámetros de los efectos termodinámicos clave en la eficiencia de la energía y el costo de capital global, realizó una optimización multi-objetivo del ORC con R134a como fluido de trabajo, abordó los aspectos termodinámicos y económicos del diseño óptimo del sistema con un algoritmo genético (NSGA-II). La eficiencia exergética y el costo capital global se seleccionaron como dos funciones objetivo. Pierobon et al. [184] en su documento hicieron un diseño óptimo de los Ciclos Rankine Orgánicos por tamaño en MW mediante el uso de optimización multi-objetivo con un algoritmo genético. Consideraron tres funciones objetivo, eficiencia térmica, volumen total del sistema y valor presente neto. Astolfi et al. [185] llevaron a cabo una optimización tecno-económica, del producto del área del intercambiador de calor por el coeficiente de transferencia de calor global (UA) que se toma como parámetro para dimensionar los intercambiadores de calor para la función de costo. Esta función de costo se usa tanto para el caso de del ORC subcrítico como transcrito. Lecompte et al. [186] realizaron un estudio termoeconómico del ORC transcrito con recuperación de calor residual. Los modelos detallados de los intercambiadores de calor se derivan y se utilizan en la estrategia de optimización. Desarrollaron un enfoque de optimización multi-objetivo en el que el criterio objetivo es la producción neta de energía frente a los costos de inversión. Andrasen et al. [187] utilizaron mezclas zeotrópicas destinadas a

minimizar la diferencia de temperatura media de los intercambiadores de calor, para mejorar el rendimiento del ciclo. En este estudio, se evaluó la viabilidad económica de las mezclas zeotrópicas en comparación con los fluidos de trabajo puros. Llevaron a cabo una optimización multi-objetivo de la energía neta y los costos de los componentes para las plantas de energía del ciclo Rankine orgánico utilizando calor a baja temperatura a 90 °C para producir electricidad de aproximadamente 500 kW.

Para el caso del subsistema de refrigeración por absorción, según Buzelin et al. [188], los sistemas de refrigeración y aire acondicionado actualmente requieren una gran demanda de energía, alrededor del 30% de la energía total controlada en todo el mundo. Es por eso que estas aplicaciones se consideran buenas opciones para su implementación en la cascada con energía geotérmica. Arivazhagan et al. [189] expresaron que se pueden usar fuentes de calor de baja temperatura, tales como calor residual, vapor de baja presión, calor solar, energía geotérmica, etc. pueden ser utilizados para alimentar (máquinas de enfriamiento por absorción. Un ciclo de enfriamiento por absorción de medio efecto podría usar fuentes de calor de baja temperatura tales como energía geotérmica de baja entalpia y calor residual disponible desde 60-80 °C [190]. Los ciclos de absorción típicamente se optimizan componente por componente o variable por variable, el método preferido es la optimización termo-económica que se enfoca en el análisis económico y exergético. Ma et al. [191] llevaron a cabo un análisis teórico de un sistema de refrigeración por absorción agua-bromuro de litio de medio efecto de dos etapas con una fuente caliente de baja temperatura. Sus resultados revelaron que el COP del ciclo de medio efecto es menor que el del sistema de simple efecto usando un par refrigerante agua-bromuro de litio. Sumathy et al. [192] desarrollaron un modelo solar de máquina de absorción de bromuro de litio de dos etapas e informaron que dos etapas de enfriadores podrían ser impulsados por agua caliente a baja temperatura que oscila desde 60 hasta 75 °C. Arivazhagan et al. [189] realizaron investigaciones experimentales de un ciclo de absorción de medio efecto utilizando un par refrigerante-absorbente R134a-DMAC. Se examinó el rendimiento del sistema en términos de rango de desgasificación, coeficiente de rendimiento y eficiencia de la segunda ley. Kizilkan et al. [193] optimizaron un ciclo de absorción de simple efecto LiBr/H₂O basado en el método de Bayer estructural. Las unidades principales se dividieron independientemente y los coeficientes de enlaces estructurales para optimizar el ciclo completo. La optimización reciente de los ciclos de absorción de NH₃/H₂O se ha estudiado en [194-196]. El diseño se presenta como un problema de optimización y se resuelve utilizando las técnicas estándar para problemas lineales, no lineales, enteros mixtos lineales, mezclados enteros no lineales. Crepinsgk et al. [197] compararon el coeficiente de rendimiento y la relación de circulación de un ciclo de enfriamiento por absorción de simple efecto y para temperaturas de refrigeración por debajo de 0 °C. El objetivo de este trabajo fue realizar dos ensayos con amoníaco-agua y posibles alternativas de pares refrigerante-absorbente. Gebreslassie et al. [198] también siguió un enfoque similar para el diseño óptimo del ciclo de absorción de efecto único amoníaco / agua. Sin embargo, este enfoque solo evalúa un subconjunto de posibles soluciones de diseño. Gebrselassie et al. [199] realizaron un análisis de exergía para los ciclos de bromuro de litio-agua de simple, doble, triple y medio efecto, calcularon la irreversibilidad inevitable. Gomri [200] presentó una simulación utilizando la energía solar como fuente de calor para calcular el rendimiento de un sistema de enfriamiento por absorción de medio efecto de dos etapas de 10 kW de capacidad. El rendimiento se calculó en base a los principios de análisis de energía y exergía. Gebreslassie et al. [201] realizaron una formulación de varios objetivos de un ciclo de absorción de simple efecto LiBr/H₂O minimizando el área del enfriador utilizando un proceso de LCA para incluir el impacto ambiental como una función objetivo adicional. Domínguez-Inzunza et al. [202] estudiaron el rendimiento de los sistemas de enfriamiento por absorción de triple efecto, medio efecto, doble efecto y doble efecto en serie que funcionan con nitrato de amoníaco-litio. Arora et al. [203] llevaron a cabo un análisis de energía y exergía del sistema de refrigeración por absorción de vapor de medio efecto

bromuro de litio-agua. Basado en el análisis de energía y exergía, se calcula la presión intermedia óptima correspondiente a los valores máximos de coeficiente de rendimiento y eficiencia exergética en diversas condiciones operativas. Consideraron los efectos de las temperaturas del generador de baja y alta presión, la temperatura del evaporador, la efectividad de los intercambiadores de calor de la solución y la diferencia entre las temperaturas del generador de baja y alta presión en los cálculos.

En el caso del subsistema de deshidratación, actualmente existen varios diseños de deshidratadores en el mercado, básicamente del tipo solar y también se han realizado algunos análisis de la optimización geométrica de los dispositivos. Para el uso de energía geotérmica hay pocos análisis de optimización de este tipo de dispositivos. Andritsos et al. [204] aplicaron la propuesta de energía geotérmica de baja entalpía para secar tomates, analizando el proceso y un sistema propuesto para su aplicación. Kumoro et al. [205] investigaron el secado de hojas de tabaco usando un sistema de calentamiento indirecto con vapor geotérmico. Obtuvieron una curva de velocidad de secado. Investigaron los efectos del flujo de vapor y el grosor de las hojas de tabaco en el secado. Dincer y Sahin [206] introdujeron un nuevo modelo para el análisis termodinámico, en términos de exergía de un proceso de secado. Las eficiencias exergéticas se derivan de las funciones de los parámetros de transferencia de calor y masa. Kavak [207] realizó un análisis termodinámico del proceso de secado de la capa delgada de fresas en un secador de ciclón para determinar la relación de uso de energía y el tipo y la magnitud de las pérdidas de exergía durante el proceso de secado. Kostoglou et al. [208] investigaron la influencia de la velocidad del aire, la temperatura del aire y las bandejas de carga de tomate en el proceso de secado utilizando la energía geotérmica de baja entalpía. El proceso de modelado consistió en dos etapas: la primera etapa se enfocó en modelar una pieza de tomate, mientras que el segundo paso se relaciona con la modelación de tomates secados al aire en un túnel con bandejas que se mueven en lotes.

A partir de la revisión de la literatura, llegamos a la conclusión de que se han dedicado pocas investigaciones a la optimización multi-objetivo de los subsistemas ORC, absorción y deshidratación, tanto termodinámica como económicamente, lo que es más razonable para el sistema de diseño de optimización con un solo objetivo.

5.3 Descripción del sistema

El sistema combinado de enfriamiento, calor y potencia (CCHP) alimentado por energía geotérmica consta de tres subsistemas, a saber, el subsistema de generación de potencia, el subsistema de refrigeración y el subsistema de deshidratación de vegetales, como se muestra en las Figuras 63 y 64.

5.3.1 Subsistema ORC

El subsistema ORC considera la aplicación de diferentes opciones del ciclo tales como son los ciclos subcrítico y supercrítico, además de considerar las disposiciones del ciclo simple, ciclo con IHE y con extracción en la turbina, como se muestran en la Figura 65 a-c). Para el ciclo simple el fluido de trabajo recibe calor del fluido geotérmico, se evapora y produce trabajo mecánico en la turbina mientras se expande. El fluido se descarga entonces al condensador, donde el calor de condensación se transfiere a un medio de enfriamiento que para este caso es una torre de enfriamiento húmeda. El condensado líquido a continuación, se bombea a presión elevada hacia el evaporador, completando así el ciclo. En el caso del ORC con IHE el fluido se descarga de la turbina al IHE antes de pasar al condensador para ceder calor al mismo fluido de trabajo después de ser bombeado hacia el evaporador. Para el ORC regenerativo se extrae una fracción del fluido de trabajo en una etapa de la turbina para ceder calor al

fluido antes de entrar al evaporador, este esquema maneja dos diferentes niveles de presión en la expansión.

Los ciclos subcríticos y supercríticos son integrados de los mismos componentes y procesos, la diferencia de estos ciclos consiste en las condiciones en que se transfiere el calor al fluido de trabajo como se muestra en los diagramas T-s de la figura 66 a-b). En cuanto al fluido de trabajo del subsistema ORC, se considera una variedad de fluidos orgánicos con propiedades termodinámicas que brindan un buen desempeño y bajo impacto negativo en el medio ambiente, esto de acuerdo a investigaciones realizadas anteriormente con aplicaciones geotérmicas [164-171]. Todos los intercambiadores de calor del ciclo ORC, se eligen con una configuración a contra-flujo de tubos y coraza.

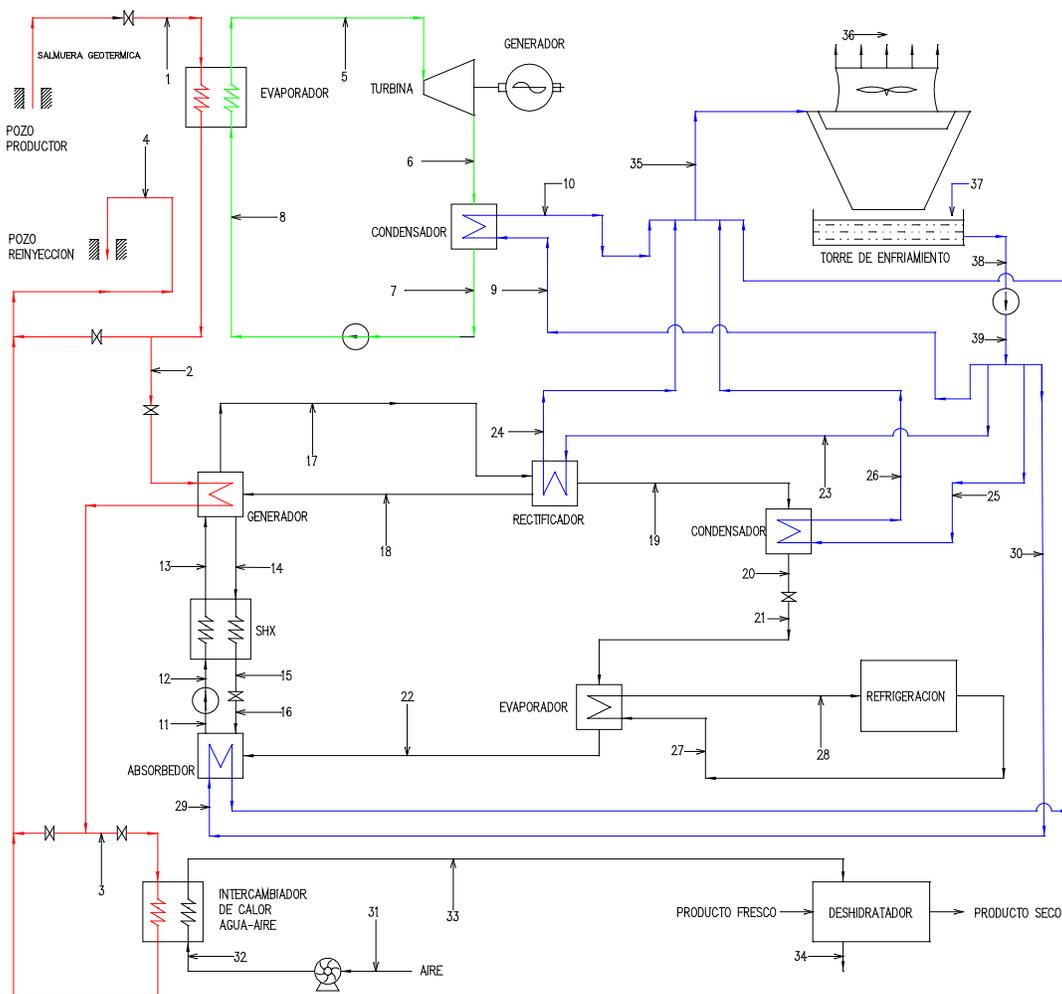


Figura 63. Esquema del sistema utilizando TAR de simple efecto.

Para una operación práctica, del subsistema ORC hay varios parámetros que se varían de manera conjunta, presentando una superficie multidimensional sobre la cual se puede encontrar un conjunto de valores de variables óptimo. Estos parámetros tienen efecto en el rendimiento del ORC y en el presente estudio, se examinan los efectos de la presión y la temperatura de entrada de la turbina, el pinch-point

en el evaporador y condensador, así como el sobrecalentamiento del fluido de trabajo, que permite evaluar el rendimiento del ORC.

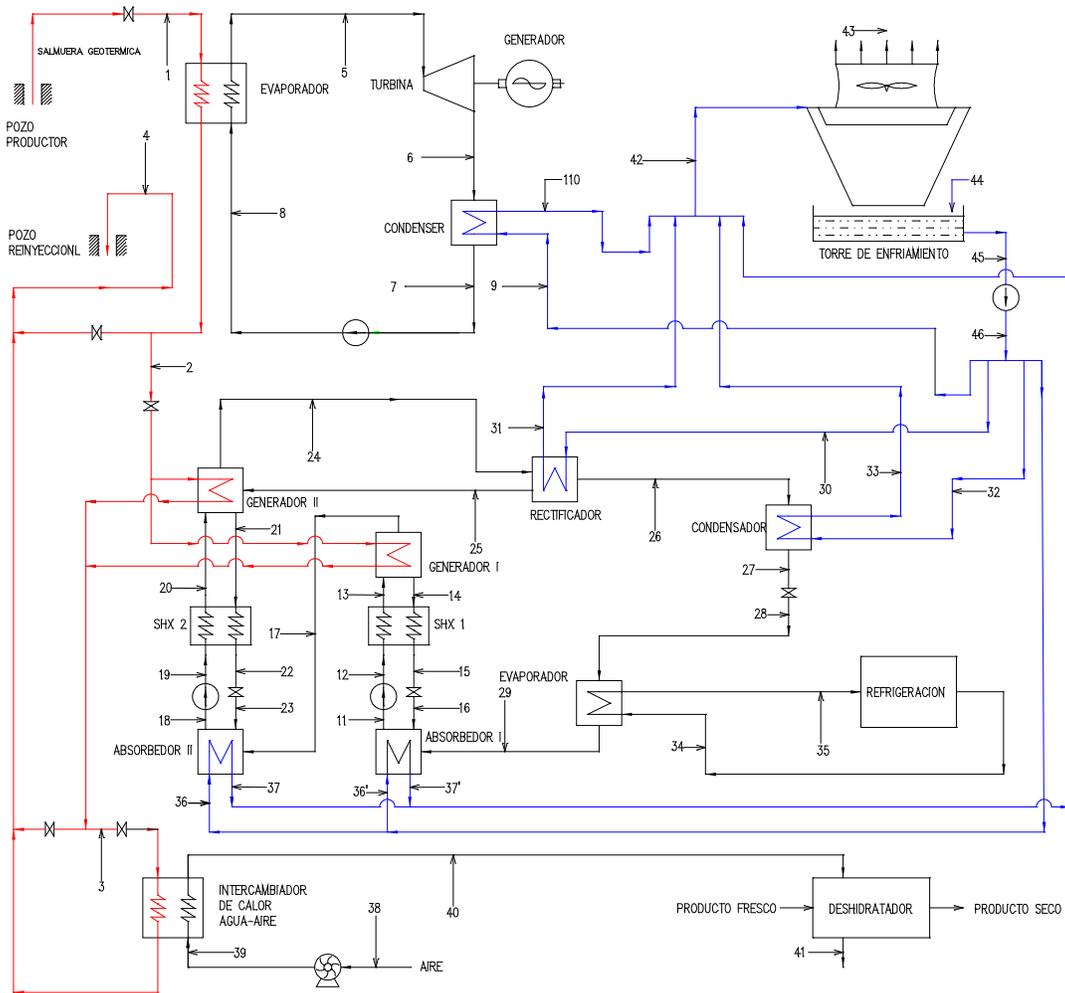


Figura 64. Esquema del sistema utilizando TAR de medio efecto.

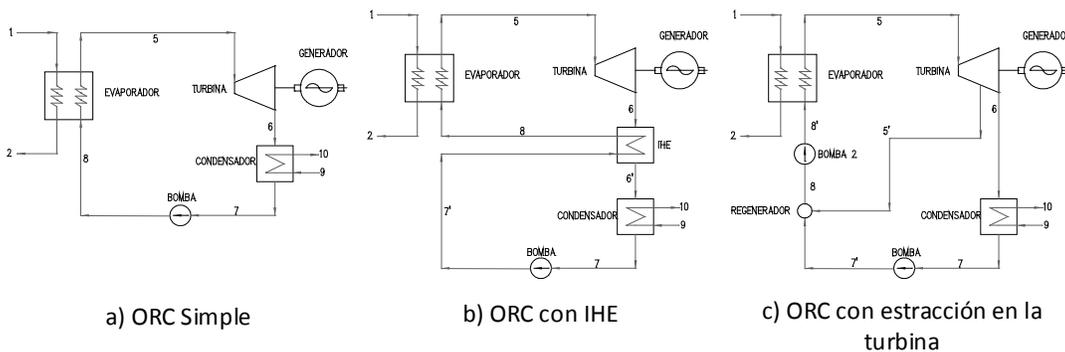


Figura 65. Alternativas del subsistema ORC.

Fluidos de trabajo. La selección adecuada del refrigerante como fluido de trabajo del ORC es clave para lograr un buen rendimiento y una buena rentabilidad del subsistema. Básicamente las características de los refrigerantes para ser buenos candidatos como fluido de trabajo son: poseer un volumen específico bajo, alta eficiencia, presión aceptable dentro del ciclo, bajo ODP, bajo GWP, bajo costo, baja toxicidad y alta seguridad.

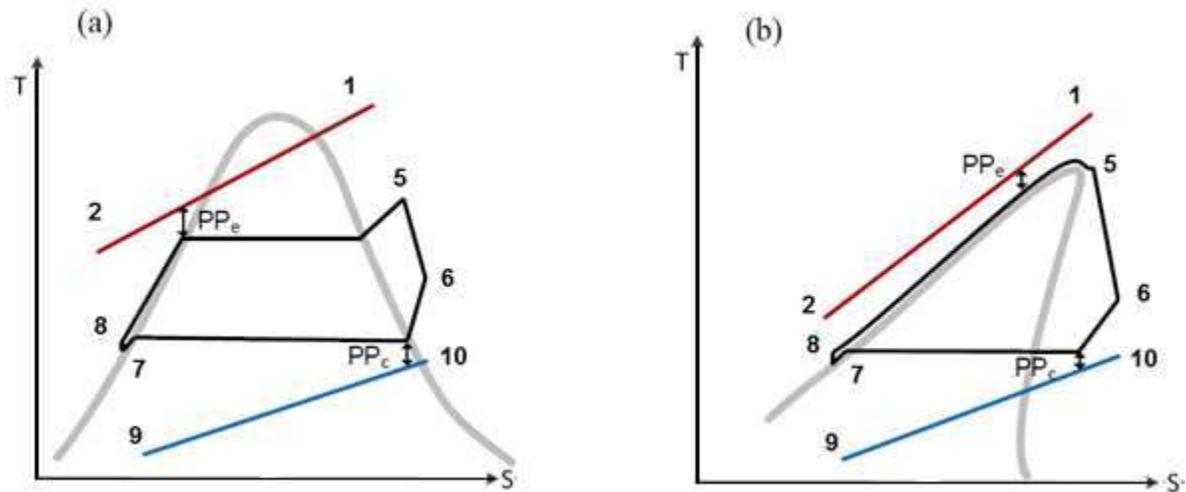


Figura 66. Diagrama T-s a) ORC subcrítico y b) ORC supercrítico.

Criterios de selección del fluido de trabajo para el ORC.

- Ambiental: Algunos fluidos son o están siendo restringidos por acuerdo internacional en función a su potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP), definido y limitado en el Protocolo de Montreal, o sobre el potencial de calentamiento global de efecto invernadero (GWP) en relación con las limitantes en el Protocolo de Kyoto, que tiene la intención de prevenir la destrucción de la capa de ozono y la emisión de los gases que causan el efecto invernadero, respectivamente.
- Seguridad: El fluido debe ser no tóxico (En caso de fugas en la planta o durante la manipulación), no corrosivo (Evidentemente evitando mayores costos de mantenimiento y/o daños a las instalaciones) y no inflamable. Por lo tanto, se utiliza la clasificación de seguridad de la ASHRAE como un indicador de grado de peligro de los fluidos.
- Estabilidad: La estabilidad química del fluido utilizado puede limitar la temperatura de la fuente de calor, ya que puede descomponerse cuando se exponen a ciertas temperaturas, sustancias productoras que podrían modificar la forma en que funciona el ciclo. Adicionalmente, puede resultar en compuestos tóxicos e irritantes que pueden inducir, si se producen fugas, en problemas de salud.
- Presión: Cuando un fluido requiere altas presiones para hacer el proceso eficiente, los costos del equipo son más elevados debido a la alta resistencia que debe soportar, también aumenta la complejidad de la planta.
- La disponibilidad y bajo costo: Un fluido de baja disponibilidad y/o alto costo limita su uso en plantas de ORC por razones obvias, a la vista de la viabilidad financiera de los proyectos.
- Calor latente y el peso molecular: Cuanto mayor sea el peso molecular y el calor latente del fluido, más energía puede ser absorbida de la fuente de calor en el evaporador y, por lo tanto, el tamaño de la instalación y el consumo de la bomba puede ser más pequeño, debido a la

disminución en el caudal requerido.

- Bajo punto de congelación: El punto de congelación del fluido debe ser inferior que la temperatura más baja del ciclo.
- Curva de saturación: Las propiedades termodinámicas del fluido indican que la pendiente de la curva de saturación será negativa, vertical, o positiva, lo que afectará en gran medida el diseño y eficiencia del ORC. La Figura 67 a-c muestra un diagrama esquemático Temperatura-Entropía (T-s) para fluidos con una curva de saturación negativa (a), vertical (b) y positiva (c), llamado húmedo, isentrópico y seco, respectivamente. Dado que el objetivo del ORC se centra en el uso de calor a temperaturas medianas y bajas, el sobrecalentamiento del vapor, como en el ciclo Rankine de vapor tradicional, no es apropiado. Además, como se muestra en la Figura 67a, cuando una expansión de un fluido húmedo no tuviera sobrecalentamiento, caería en el área de mezcla saturada, causando daños a la turbina e ineficiencias en el ciclo, entre otras razones, debido al cambio de fase. El caso contrario ocurre con los fluidos isentrópicos y secos que, sin ningún tipo de sobrecalentamiento, amplían y caen en la zona de vapor saturado (Figura 67b) y/o en la zona sobrecalentado (Figura 67c), respectivamente. Por lo tanto, en este último caso, puede ser necesario un intercambio intermedio que permite aún más el uso de la energía del vapor expandido, precalentando el fluido desde la bomba antes de que entre en el evaporador, aumentando así la eficiencia del ciclo.

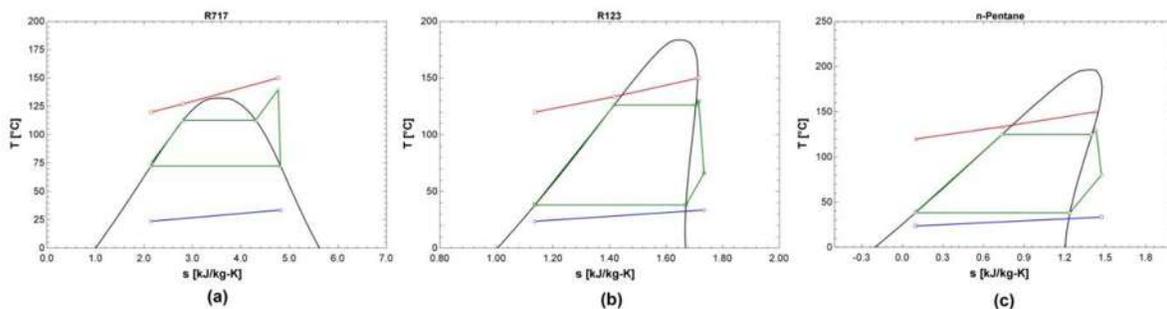


Figura 67. Diagrama T-s para fluidos (a) húmedos, (b) isentrópicos y (c) secos.

Las relativamente bajas temperaturas que se destinan para uso en el ORC hacen que la eficiencia global del ciclo sea altamente sensible a ineficiencias en la transferencia de calor, que depende en gran medida de las propiedades termodinámicas del fluido y las condiciones bajo las cuales está operando. Por lo tanto, hay numerosos estudios que conducen a la búsqueda de un fluido de trabajo adecuado y satisfactorio para estos sistemas, en la medida de lo posible, todos los aspectos mencionados al inicio de esta sección. La Tabla 18 muestra una lista de los fluidos de trabajo considerados en este estudio y algunas de sus propiedades.

Tabla 18. Fluidos de trabajo considerados para ciclos ORC subcríticos y supercríticos.

Fluido de trabajo	M [g/mol]	T _{bp} [°C]	T _{crit} [°C]	P _{crit} [kPa]	Grupo de seguridad 34 ^a	GWP (100 años)	ODP	ALT (años)
R245fa	134.05	15.14	154.01	3651.0	B1	1050	0.000	7.7
R236fa	152.04	-1.44	124.92	3200.0	A1	9820	0.000	242
R152a	66.051	-24.023	113.26	4516.8	A2	133	0.000	1.5
R227ea	170.03	-16.34	101.75	2925.0	A1	3580	0.000	38.9
R134a	102.03	-26.074	101.06	4059.3	A1	1370	0.000	13.4

R143a	84.041	-47.241	72.707	3761.0	A2L r	4180	0.000	47.1
R125	120.02	-48.09	66.023	3617.7	A1	3420	0.000	28.2
n-pentano	72.149	36.06	196.55	3370.0	A3	-20	0.000	0.009
R600	58.122	-0.49	151.98	3796.0	A3	-20	0.000	0.018
R600a	58.122	-11.749	134.66	3629.0	A3	-20	0.000	0.016
R141b	116.95	32.05	204.35	4212.0	n.a	717	0.120	9.2
R123	152.93	27.823	183.68	3661.8	B1	77	0.010	1.3
R142b	100.5	-9.12	137.11	4055.0	A2	2220	0.060	17.2
R218	188.02	-36.83	71.95	2600.0	A1	8830	0.000	2600
R41	34.03	-78.12	44.13	5800.0	n.a.	92	0.000	2.4
R717	17.03	-33.327	132.25	11333.0	B2L r	<1	0.000	<0.02

Para complementar los criterios de selección de los fluidos de trabajo se agrega la consideración del costo beneficio que puede generar el uso de dichos fluidos considerados, la Figura 68 nos muestra una matriz de decisión que nos resume las consideraciones mas importante en la selección del fluido de trabajo del ORC.



Figura 68. Matriz de decisión para la selección del fluido de trabajo.

Análisis del Pinch-Point. La razón para el intercambio de calor entre dos fluidos es la diferencia de temperaturas entre los dos. En un ORC cada intercambiador de calor puede ser dividido en 3 zonas: líquido, bifásica y vapor. Los perfiles de temperatura en los intercambiadores de calor, son gráficas donde se muestra una diferencia de temperatura mínima tanto en la evaporación como en la condensación. Este punto es un parámetro fundamental para el diseño de un ciclo de potencia y es llamado "Pinch Point". Este valor siempre debe ser positivo, un valor negativo conlleva a un intercambio de calor imposible:

- Un valor "pinch" pequeño conlleva a una compleja transferencia de calor y por lo tanto se requiere una mayor área de transferencia de calor tendiendo a ser infinita.

- Valores nulos o negativos de "pinch" representaría un intercambio de calor imposible de alcanzar.

5.3.2 Subsistemas de refrigeración por absorción

Como se mencionó en la sección 3.2.2 el efecto de enfriamiento se puede lograr usando máquinas de enfriamiento por absorción con pares de trabajo agua-amoniaco y bromuro de litio-agua. En este estudio solo tres posibilidades se consideran como alternativas: refrigeración por absorción de simple efecto con bromuro de litio-agua, de simple efecto con amoniaco-agua y de medio efecto amoniaco-agua. Por simplicidad la descripción de los procesos de dichos sistemas son tal como se describieron en la sección 3.2.2. Todos los intercambiadores de calor del subsistema TAR se consideran de placas del tipo chevron y se analizan de acuerdo a la geometría mostrada en la Figura 70.

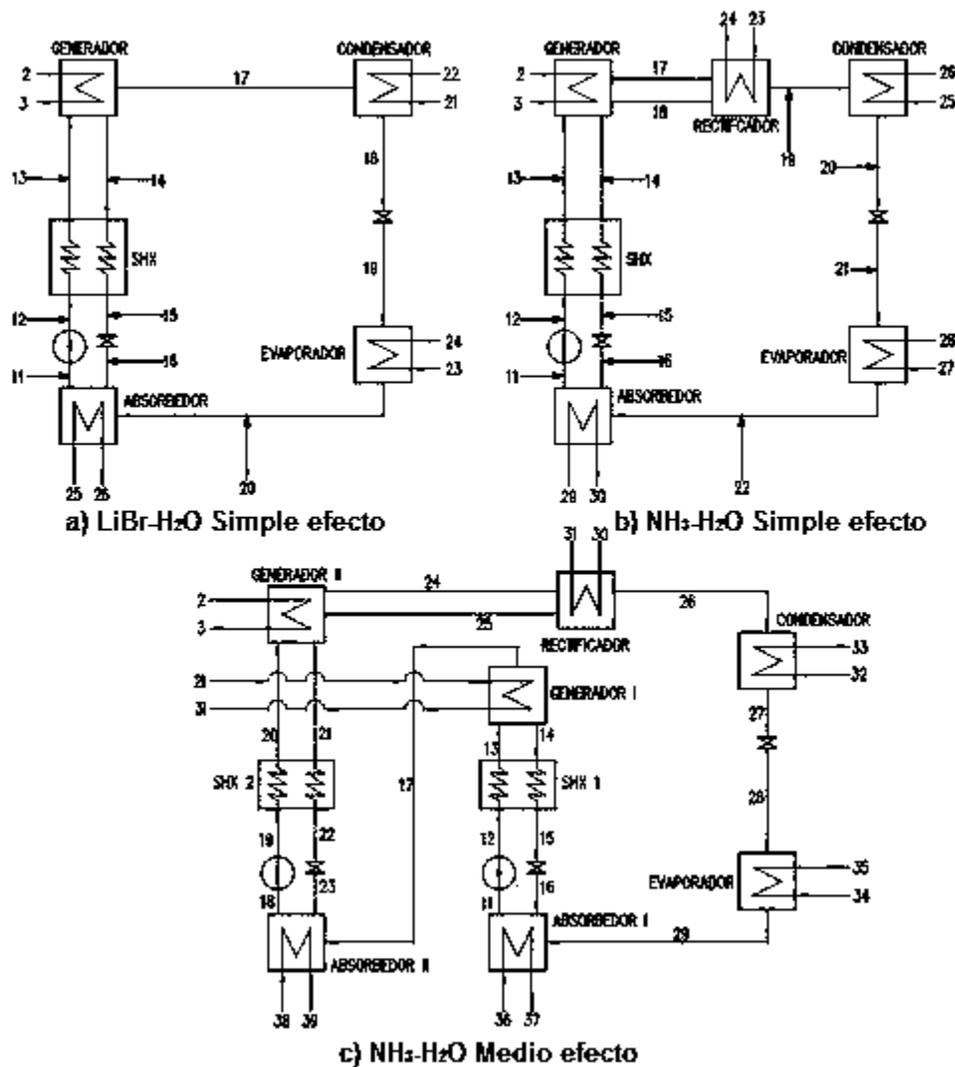


Figura 69. Subsistemas de enfriamiento por absorción.

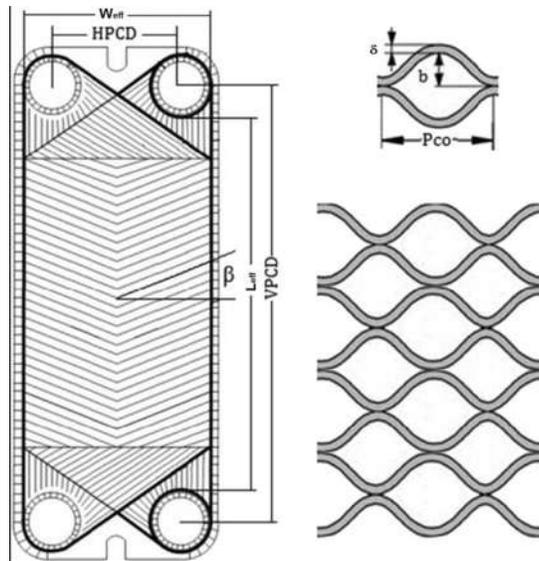


Figura 70. Geometría del intercambiador de calor de placas tipo Chevron.

5.3.3 Uso térmico del tercer nivel

El subsistema que se utiliza para el uso directo en el tercer nivel, es simplemente un intercambiador de calor de agua caliente con una temperatura de aprovechamiento cercana a los 70 °C [108], el intercambiador cede su energía térmica al aire, que es el fluido de trabajo del dispositivo deshidratador de jitomate que se encuentra acoplado al intercambiador de calor como se muestra esquemáticamente en la Figura 71. El aire se introduce al sistema deshidratador desde el medio ambiente por medio de un sistema de tiro forzado, toma la energía térmica cedida por el fluido geotérmico para después entrar en el deshidratador retirando la humedad de los vegetales para finalmente ser desfogado del sistema. Para este análisis se considera como base la planta de secado de jitomates a pequeña escala ubicada en Nea Kessani, Xanthi, Grecia [209]. Los jitomates se secan con agua caliente geotérmica en módulos tipo secador de túnel rectangular de 14 m de largo (1 m de ancho y 2 m de alto) de acero inoxidable con bandejas de 100 × 50 cm de acero inoxidable [209].

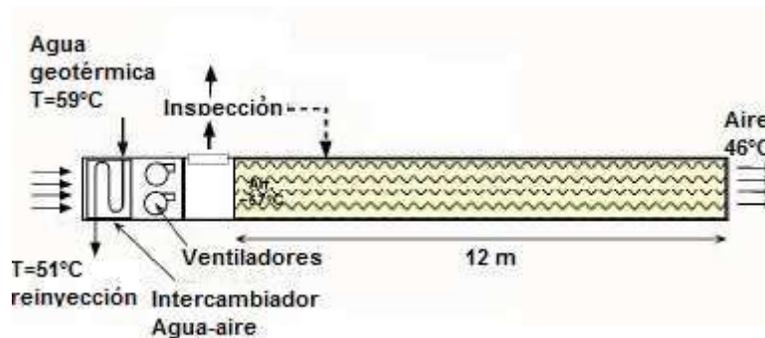


Figura 71. Esquema del deshidratador de jitomate [209].

5.4 Metodología

La optimización multi-objetivo u optimización multi-criterio, juega un papel muy importante en el campo del diseño de las plantas de poli-generación que se analizan en este apartado, en cuestión de ingeniería, gestión y toma de decisiones. Esto significa que existe un compromiso entre objetivos, y alcanzar la condición óptima para un objetivo requiere comprometer el valor de uno o más del resto de los objetivos. Para el caso de estudio de esta tesis el método de optimización multi-objetivo del sistema de poli-generación se ha desarrollado en el entorno de Matlab.

La metodología adoptada para la caracterización del sistema de poligeneración sigue el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 72. Primero, cada disposición incluida se selecciona sobre la misma base de acuerdo con la temperatura y el flujo másico del fluido geotérmico. Luego, se establecen los supuestos termodinámicos y generales de los componentes individuales, así como los del sistema integrado. Posteriormente, se definen los aspectos específicos del tipo de ORC y la aplicación de refrigeración, seguidos de una verificación de las limitantes tecnológicas para operar cada componente individual. Finalmente, los balances de masa, energía y exergía se aplican para calcular todos los flujos de energía y exergía, incluidos los parámetros de rendimiento de cada fluido de trabajo del ORC y tecnologías de absorción.

La estrategia del modelado del sistema propuesto es la siguiente: En primer lugar se describen las configuraciones para los casos del uso en cascada de la energía geotérmica y la termodinámica del sistema global. En segundo lugar, se discuten los modelos de intercambiadores de calor y, por último, se introducen los modelos de costos del sistema. El propósito multi-objetivo de la optimización es minimizar el costo inversión, maximizar el valor actual neto (VAN) y la eficiencia exergetica global del sistema. Se lleva a cabo una optimización del sistema lo que significa que los parámetros de los ciclos y las configuraciones con todos los componentes están optimizados en conjunto.

El modelado de la optimización multi-objetivo de la planta de poli-generación con el uso en cascada de la energía geotérmica se desarrolla en dos etapas, en la etapa inicial se realiza una optimización para cada subsistema en particular con la intención de determinar las condiciones óptimas de cada subsistema y que estos valores sirvan como datos para alimentar la optimización de la segunda etapa, en la segunda etapa se realiza la optimización multi-objetivo del sistema global en base a los datos proporcionados por las optimizaciones de los subsistemas realizada en la etapa inicial. La optimización multi-objetivo se adquiere mediante el uso de la solución lógica dada en la Figura 72.

Suposiciones y consideraciones

Para llevar a cabo el modelado termodinámico de la planta de poligeneración que funciona en cascada, el siguiente conjunto de suposiciones está establecido:

- a) El sistema integrado y todos los subsistemas funcionan en estado estable y a plena carga.
- b) No hay variación en la potencia, la refrigeración o las demandas térmicas a lo largo del año.
- c) Los cambios en la energía cinética y potencial son insignificantes.
- d) El fluido geotérmico se considera agua caliente en estado de líquido comprimido.
- e) Las propiedades termodinámicas del agua pura se utilizan para el fluido geotérmico.
- f) El flujo másico del fluido geotérmico se supone 20 kg/s, ya que es un flujo másico típico de pozos geotérmicos con temperatura de baja a mediana para aplicaciones de CHP [139].

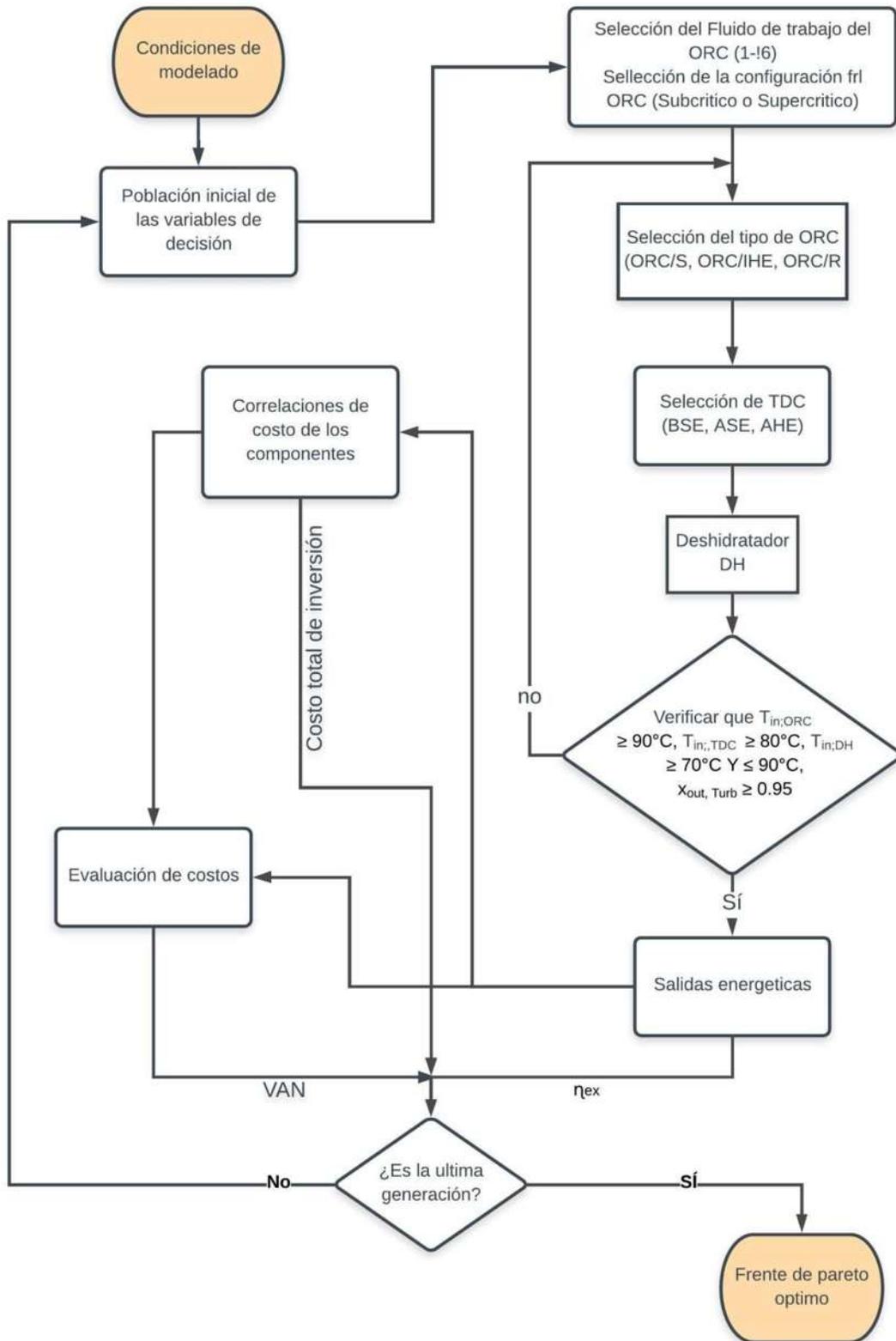


Figura 72. Metodología adoptada para la optimización multi-objetivo.

- g) La temperatura del fluido geotérmico se considera en el rango de 80 °C a 150 °C, ya que cubre el rango de temperatura de los pozos geotérmicos clasificados como recursos geotérmicos de bajo-grado [140].
- h) Los valores de referencia de entalpia y entropía para el análisis exergético se determinan teniendo en cuenta la temperatura ambiente de 20 °C y una presión de 100 kPa.

Suposiciones para el subsistema ORC

- a) La eficiencia de conversión de energía es una función de la temperatura del fluido caliente en la entrada de este dispositivo.
- b) Las pérdidas de calor a través de los componentes del sistema son insignificantes.
- c) Las turbinas y bombas se consideran con una eficiencia isoentrópica de 80% y 75%, respectivamente [143].
- d) La eficiencia del generador eléctrico es del 96% [143].
- e) La temperatura del agua de enfriamiento para los procesos de rechazo de calor es de 25 °C.
- f) Se supone que la turbina es axial, ya que las turbinas axiales son comúnmente utilizadas por fabricantes en el rango de potencia (aproximadamente 50-600 kW) [179].
- g) El condensador rechaza el calor al agua de enfriamiento.

Suposiciones del subsistema TAR

El tipo y el par de trabajo de refrigeración de la máquina de absorción se definen en función de la temperatura del agua caliente. En este estudio, las máquinas de enfriamiento de absorción consideradas son LiBr/H₂O de simple efecto (BSE) y NH₃/H₂O de simple efecto (ASE) para aire acondicionado, mientras que el par de trabajo NH₃/H₂O es adecuado para refrigeración, simple y medio efecto (ASE y AHE) son considerados. Además, las siguientes consideraciones se asumen:

- a) El COP es una función de la temperatura del fluido caliente.
- b) Las pérdidas de calor a través de componentes internos son insignificantes.
- c) Pérdidas de temperatura y presión del par de trabajo de refrigeración en el proceso de separación y condensación son despreciados.
- d) Las mezclas están en equilibrio tanto en el generador como en el absorbedor a la temperatura de funcionamiento [144].
- e) La temperatura del agua de refrigeración para el proceso de rechazo de calor es de 25 °C.
- f) La eficiencia de la bomba de solución es del 60% [145].
- g) Para aplicaciones de enfriamiento, la temperatura de operación en el evaporador es de 2 °C para refrigeración [137].
- h) La temperatura de diseño en el condensador y el absorbedor es de 30 °C
- i) El condensador y el absorbedor rechazan el calor al agua de enfriamiento.

Suposiciones del subsistema DH

- a) La efectividad del intercambiador de calor se considera como 0.7 para aplicaciones de usos directos [210].
- b) Cada módulo contiene 25 bandejas de acero inoxidable.
- c) La carga por bandeja es de 7 kg de jitomates frescos en cada bandeja.
- d) El tiempo estimado de residencia máximo de secado es durante 30 horas.
- e) Para garantizar la seguridad y la calidad del producto, se definió la temperatura de funcionamiento del deshidratador por encima de 45 °C y por debajo de 65 °C, ya que el rango de temperatura ideal para el crecimiento bacteriano está entre 25 °C y 45 °C y el producto

puede perecer si la temperatura supera los 65 °C [211]; por ejemplo, el ácido ascórbico (vitamina C) es sensible a las altas temperaturas y ambientes muy húmedos [212].

Tabla 19. Parámetros fijos del sistema y variables de decisión.

Subsistema ORC		
Variable	Descripción	Valor
T_1	Temperatura de la salmuera geotérmica [°C]	80-150
ΔT_{ORC}	Diferencia de temperatura de entrada/salida del ORC	Optimizada
$PPTD_{ev}$	Diferencia de temperatura pinch point del evaporador [°C]	Optimizada
$PPTD_{ond}$	Diferencia de temperatura pinch point del condensador [°C]	Optimizada
T_9	Temperatura de agua de enfriamiento al condensador [°C]	25
T_5	Temperatura de entrada a la turbina	Optimizada
P_e	Presión de evaporación [bar]	Optimizada
P_c	Presión de condensación [bar]	Optimizada
ΔT_S	Sobrecalentamiento	Optimizada
η_T	Eficiencia isentrópica de la turbina [%]	80
η_P	Eficiencia isentrópica de la bomba [%]	75
η_G	Eficiencia del generador eléctrico [%]	96
Subsistema de Absorción		
T_2	Temperatura de entrada al generador [°C]	Optimizada
T_{24}, T_{26}, T_{30}	Temperatura de entrada del agua de enfriamiento [°C]	25
P_h	Presión alta del ciclo [bar]	Optimizada
P_l	Temperatura Intermedia del ciclo [bar] (ciclo de medio efecto)	Optimizada
T_{ev}	Temperatura del evaporador [°C]	2
ϵ_{SXH}	Efectividad del Intercambiador de calor de la solución	0.7
ΔT_{TAR}	Diferencia de temperatura de entrada/salida del TAR	Optimizada
Subsistema de deshidratación		
ϵ_{HX}	Efectividad del intercambiador de calor del deshidratador	0.7
ΔT_{HX}	Diferencia de temperatura de entrada/salida del HX	Optimizada
T_4	Temperatura de salida de la salmuera geotérmica [°C]	50

Propiedades termodinámicas. Para el análisis termodinámico, es necesario calcular las propiedades termodinámicas del agua geotérmica, los fluidos de trabajo del ORC, así como del par de trabajo de los subsistemas de refrigeración por absorción. Para los fluidos de trabajo del ORC y la mezcla agua-amoniaco, se utiliza el software EES® para determinar las propiedades termodinámicas. Para el par de trabajo bromuro de litio, concentración, entalpía, calor específico y entropía son determinadas utilizando las correlaciones propuestas por Kaita [147].

5.4.1 Modelado termodinámico

La caracterización de los componentes principales de los sistemas en cascada geotérmica se basan en balances de masa y energía y parámetros de conversión de energía, tales como eficiencia energética de diseño del ORC, COP del TAR y efectividad de los intercambiadores de calor, respectivamente. Un modelo termodinámico de la planta de poli-generación geotérmica se desarrolla en EES®, utilizando las ecuaciones de balance de masa y energía. Para asegurar resultados precisos de este modelo, la producción de potencia específica calculada por el modelo se compara con el rendimiento y la potencia específica reportados para varias plantas que operan bajo los ciclos que integran esta planta como se informa en la literatura [176, 188]. Las ecuaciones consideradas para realizar el análisis energético de este estudio son las mismas ecuaciones que se muestran en las Tablas 8 y 9 del capítulo 3 complementadas con las ecuaciones mostradas en las Tablas 21 y 22.

Los balances de masa, energía y exergía para cualquier volumen de control en estado estacionario se pueden expresar como:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (5.1)$$

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} \left(h_{in} + \frac{1}{2} V_{in}^2 + g z_{in} \right) - \sum \dot{m}_{out} \left(h_{out} + \frac{1}{2} V_{out}^2 + g z_{out} \right) \quad (5.2)$$

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} b_{in} - \sum \dot{m}_{out} b_{out} - \dot{B}_d \quad (5.3)$$

donde \dot{Q} y \dot{W} son la entrada neta de calor y la producción de trabajo, \dot{m} es el flujo de masa del fluido, h es la entalpía, los subíndices in y out para entrada y salida, \dot{B}_d es la destrucción total de exergía del sistema, T_j es la temperatura a la que se lleva a cabo la transferencia de calor. Por definición la exergía destruida es el producto de la entropía generada en un sistema por la temperatura del punto muerto o del estado de referencia T_0 . El flujo específico de exergía está dado por:

$$b = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5.4)$$

donde el subíndice 0 indica que las propiedades están en el estado muerto y T_0 es la temperatura del estado muerto.

En los intercambiadores de calor, el fluido de trabajo puede trabajar en diferentes fases, líquido, bifásica y vapor. La fórmula general del flujo de calor en cualquier región de los intercambiadores de calor se da por [213]

$$\dot{Q} = (UA)LMTD_m \quad (5.5)$$

La diferencia de temperatura media logarítmica se expresa como

$$LMTD_m = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}\right)} \quad (5.6)$$

El coeficiente de transferencia de calor global está dado por

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{\delta}{\lambda_m} + \frac{1}{h_c} \quad (5.7)$$

donde el coeficiente de transferencia de calor por convección para flujo monofásico se expresa como

$$h = \frac{\lambda \cdot Nu}{D_h} \quad (5.8)$$

Para la región monofásica, el número de Nusselt se calcula utilizando la correlación de Chisholm y Wanniarachchi;

$$Nu = 0.724 \left(\frac{6\beta}{\pi} \right)^{0.646} Re^{0.583} Pr^{1/3} \quad (5.9)$$

donde β representa el ángulo de chevron de las placas [214].

Para la región de dos fases, el proceso de transferencia de calor se divide en secciones relativamente pequeñas para que las propiedades en cada sección se puede suponer que es constante con ligeras variaciones de propiedades. Los números de Nusselt son diferentes cuando el fluido de trabajo se evapora o condensa. Para cada sección, los cálculos de número de Nusselt [215] en el lado caliente y en el lado frío cuando el fluido de trabajo está en la región de dos fases puede ser dado respectivamente por:

$$Nu_{i,h} = 4.118 Re_{eq,i}^{0.4} Pr_i^{\frac{1}{3}} \quad (5.10)$$

$$Nu_{i,c} = 1.926 Re_{eq,i}^{0.4} Pr_i^{\frac{1}{3}} Bo_{eq,i}^{0.3} \left[1 - x_{m,i} + x_{m,i} \left(\frac{\rho_1}{\rho_v} \right)^{0.5} \right] \quad (5.11)$$

Para los sistemas de absorción se tiene que el coeficiente de transferencia de calor global realmente depende de la construcción de los intercambiadores de calor y las propiedades del fluido, por lo tanto, para este análisis los valores de U para cada unidad de intercambiador dentro del sistema de absorción se determinan y se enumeran de acuerdo a la Tabla 20 [216].

Tabla 20: Parámetro de diseño del valor U para cada unidad de intercambiador de calor.

Intercambiador de calor	Tipo de HX	U [kW/m ² K]	
		LiBr-H ₂ O	NH ₃ -H ₂ O
Absorbedor	Tubos y coraza	0.85	0.85
SHX	Placas	1.10	1.10
Generador	Tubos y coraza	0,85	0,85
Rectificador	Tubos y coraza	-	1.00
Condensador	Tubos y coraza	1.10	1.10
Evaporador	Tubos y coraza	1.50	1.50

5.4.2 Ecuaciones de balances

Para el subsistema ORC los estados se basan en las corrientes de flujo de las Figuras. 65 a-c), para los subsistemas de enfriamiento y de intercambio de calor los estados termodinámicos se basan en las corrientes de flujo de las Figuras 69 a-c), las relaciones energéticas se indican en la Tabla 21 y Tabla 22 respectivamente.

Tabla 21. Relaciones energéticas del subsistema ORC del sistema de poligeneración.

Equipo	Relaciones de energía		
	Simple	Con IHE	Con regeneración
Evaporador	$\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_1 C_P (T_1 - T_2)$ $\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_8 (h_5 - h_8)$	$\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_1 C_P (T_1 - T_2)$ $\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_8 (h_5 - h_8)$	$\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_1 C_P (T_1 - T_2)$ $\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_8 (h_5 - h_8)$
Turbina	$\eta_T = \frac{(h_5 - h_6)}{(h_5 - h_{6S})}$ $\dot{W}_T = \dot{m}_5 (h_5 - h_6)$	$\eta_T = \frac{(h_5 - h_6)}{(h_5 - h_{6S})}$ $\dot{W}_T = \dot{m}_5 (h_5 - h_6)$	$\eta_T = \frac{(h_5 - h_6)}{(h_5 - h_{6S})}$ $\dot{W}_T = \dot{m}_5 [(h_5 - h_{5'}) + (1 - y)(h_{5'} - h_6)$
Generador eléctrico	$\dot{W}_e = \dot{W}_T * \eta_G$	$\dot{W}_e = \dot{W}_T * \eta_G$	$\dot{W}_e = \dot{W}_T * \eta_G$
Condensador	$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_6 (h_6 - h_7)$ $\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_9 C_P (T_{10} - T_9)$	$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_{6'} (h_{6'} - h_7)$ $\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_9 C_P (T_{10} - T_9)$	$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_6 (h_6 - h_7)$ $\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_9 C_P (T_{10} - T_9)$
Bomba	$\eta_P = \frac{(h_{8S} - h_7)}{(h_8 - h_7)}$ $\dot{W}_P = \dot{m}_7 (h_8 - h_7)$	$\eta_P = \frac{(h_{7'S} - h_7)}{(h_{7'} - h_7)}$ $\dot{W}_P = \dot{m}_7 (h_{7'} - h_7)$	$\eta_P = \frac{(h_{7'S} - h_7)}{(h_{7'} - h_7)}$ $\dot{W}_P = \dot{m}_7 (h_{7'} - h_7)$
IHE	NO INCLUIDO	$\dot{Q}_{IHE} = \dot{m}_6 (h_6 - h_{6'})$ $\dot{Q}_{IHE} = \dot{m}_{7'} (h_8 - h_{7'})$	NO INCLUIDO
Regenerador	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$y = \frac{h_8 - h_{7'}}{h_{5'} - h_{7'}}$
Bomba 2	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\eta_{P2} = \frac{(h_{8'S} - h_8)}{(h_{8'} - h_8)}$ $\dot{W}_{P2} = \dot{m}_8 (h_{8'} - h_8)$

Tabla 22. Relaciones energéticas de los subsistemas TAR y DH de los arreglos de poligeneración.

Equipo	Relaciones energéticas		
	LiBr-H ₂ O	NH ₃ -H ₂ O Simple efecto	NH ₃ -H ₂ O Medio efecto
Generador	$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_2 C_P (T_2 - T_3)$ $\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{13} h_{13}$	$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_2 C_P (T_2 - T_3)$ $\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{18} h_{18}$	$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_2 C_P (T_2 - T_3)$ $\dot{Q}_{Gen1} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{13} h_{13}$
Rectificador	NO INCLUIDO	$\dot{Q}_{Rec} = \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{18} h_{18} - \dot{m}_{19} h_{19}$ $\dot{Q}_{Rec} = \dot{m}_{23} (h_{24} - h_{23})$	$\dot{Q}_{Rec} = \dot{m}_{24} h_{24} - \dot{m}_{25} h_{25} - \dot{m}_{26} h_{26}$ $\dot{Q}_{Rec} = \dot{m}_{30} (h_{31} - h_{30})$
Condensador	$\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{21} C_P (T_{22} - T_{21})$ $\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{17} (h_{17} - h_{18})$	$\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{25} C_P (T_{26} - T_{25})$ $\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{19} (h_{19} - h_{20})$	$\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{32} C_P (T_{33} - T_{32})$ $\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{26} (h_{26} - h_{27})$
Evaporador	$\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{19} (h_{20} - h_{19})$ $\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{23} (h_{23} - h_{24})$	$\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{21} (h_{22} - h_{21})$ $\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{27} (h_{27} - h_{28})$	$\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{28} (h_{29} - h_{28})$ $\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{34} (h_{34} - h_{35})$
Absorbedor	$\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{20} h_{20} - \dot{m}_{11} h_{11}$ $\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{25} (h_{26} - h_{25})$	$\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{22} h_{22} - \dot{m}_{11} h_{11}$ $\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{29} (h_{30} - h_{29})$	$\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{36} C_P (T_{37} - T_{36})$ $\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{29} h_{29} - \dot{m}_{11} h_{11}$

SHX	$\epsilon_{SHX} = \frac{(T_{13} - T_{12})}{(T_{14} - h_{12})}$	$\epsilon_{SHX} = \frac{(T_{13} - T_{12})}{(T_{14} - h_{12})}$	$\epsilon_{SHX} = \frac{(T_{13} - T_{12})}{(T_{14} - h_{12})}$
Bomba	$\eta_P = \frac{(h_{12S} - h_{11})}{(h_{12} - h_{11})}$ $\dot{W}_{P,TAR} = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11})$	$\eta_P = \frac{(h_{12S} - h_{11})}{(h_{12} - h_{11})}$ $\dot{W}_{P,TAR} = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11})$	$\eta_P = \frac{(h_{12S} - h_{11})}{(h_{12} - h_{11})}$ $\dot{W}_{P,TAR} = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11})$
Válvula 1	$h_{15} = h_{16}$	$h_{15} = h_{16}$	$h_{15} = h_{16}$
Válvula 2	$h_{18} = h_{19}$	$h_{20} = h_{21}$	$h_{27} = h_{28}$
Generador II	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{Q}_{Gen2} = \dot{m}_2 C_p (T_2 - T_3)$ $\dot{Q}_{Gen2} = \dot{m}_{21} h_{121} + \dot{m}_{24} h_{24} - \dot{m}_{20} h_{20} - \dot{m}_{25} h_{125}$
Absorbedor II	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{38} C_p (T_{39} - T_{38})$ $\dot{Q}_{ABS2} = \dot{m}_{23} h_{23} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{18} h_{18}$
SHX II	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\epsilon_{SHX2} = \frac{(T_{20} - T_{19})}{(T_{21} - h_{19})}$
Bomba 2	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$\eta_P = \frac{(h_{19S} - h_{18})}{(h_{19} - h_{18})}$ $\dot{W}_{P,TAR2} = \dot{m}_{18}(h_{19} - h_{18})$
Válvula 3	NO INCLUIDO	NO INCLUIDO	$h_{22} = h_{23}$
DH	$\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_3 C_p (T_3 - T_4)$ $\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_{27}(h_{28} - h_{27})$	$\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_3 C_p (T_3 - T_4)$ $\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_{31}(h_{32} - h_{31})$	$\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_3 C_p (T_3 - T_4)$ $\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_{40}(h_{41} - h_{40})$

5.4.2.1 Evaluación del rendimiento

Para llevar a cabo la optimización del sistema de poligeneración en cascada, se calculan los parámetros de rendimiento basados en los conceptos de energía y exergía. La eficiencia de la primera ley se puede expresar como la relación de salidas de energía y entradas de energía [114, 148].

$$\eta_I = \left(\frac{\dot{W}_{Net} + \dot{Q}_{Enfriamiento} + \dot{Q}_{UD}}{\dot{Q}_{Geo}} \right) \quad (5.12)$$

$$\dot{Q}_{Geo} = \dot{m}_1 C_{p_{w1}} (T_1 - T_4) \quad (5.13)$$

Utilizando la exergía del agua geotérmica como la exergía de entrada a la planta, la eficiencia de la segunda ley de la planta geotérmica de poligeneración se puede definir como [114, 148]

$$\eta_{ex} = \left(\frac{\dot{W}_{Net} + \dot{B}_{Enfriamiento} + \dot{B}_{UD}}{\dot{B}_{in}} \right) \quad (5.14)$$

$$\dot{B}_{in} = \dot{B}_1 - \dot{B}_4 \quad (5.15)$$

5.4.3 Modelado económico

Además del análisis termodinámico, se desarrolló un modelo económico para determinar la rentabilidad del sistema de poligeneración geotérmica. Acoplando el modelo energético y económico, es posible estimar la viabilidad del sistema. Hay varios indicadores económicos para estimar el comportamiento económico de un cierto proyecto de inversión, pero el indicador más utilizado es el Valor Actual Neto (VAN). Para determinar el VAN, es necesario estimar los costos capital, gastos, ingresos y costos de

operación y mantenimiento (O & M). El costo capital representa el primer resultado relacionado con la adquisición, construcción, instalación y puesta en marcha del sistema. Para el sistema en cascada geotérmica estudiado aquí, tales gastos incluyen perforación, compra de componentes principales (ORC, TAR y sistema de deshidratación), subsistemas, tuberías, etc.

Para planear y proyectar sistemas de energía tales como los sistemas de poligeneración con el uso en cascada de la energía geotérmica, las consideraciones económicas forman la base para la toma de decisiones. Los costos en la economía de los sistemas energéticos puede ser divididos en tres categorías: costos de capitales, que contienen la inversión inicial incluyendo la instalación, costos de operación y mantenimiento del sistema y los costos para energía y otros materiales que entran al sistema.

El costo de capital asociado a la perforación se puede estimar como función de profundidad de perforación con una expresión simple dada por la Ecuación (4.11) [157]. De acuerdo con estudios previos de varias reservas geotérmicas mexicanas, agua caliente geotérmica a la temperatura asumida en este estudio, está disponible perforando a una profundidad en el rango entre 200 y 300 m [21]. Para este estudio, un pozo geotérmico con 300 m de profundidad fue considerado.

La estimación inicial de los costos de inversión de una nueva planta de poligeneración con el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpia es una tarea desafiante, esto es debido a que el diseño cada vez evoluciona a un mayor detalle. Las estimaciones de las plantas se clasifican según su nivel de detalle y por lo tanto su exactitud (Tabla 23). Los rangos de exactitud indican variaciones complejidad del proyecto, información de referencia adecuada y una determinación adecuada de las contingencias [217]. Los rangos representados en la Tabla 23 son aplicables para proyectos de la industria de proceso [217]. La subestimación de los costos de capitales se produce principalmente debido a la lista incompleta de todo el equipo necesario en el proceso [218]. Un nivel creciente de detalle implica un rango de precisión más pequeño, pero de forma similar una cantidad creciente de esfuerzo y horas de trabajo para hacer la estimación. Estimaciones realizadas en investigación son generalmente de orden de magnitud, estudio y estimaciones preliminares de diseño.

Tabla 23. Clasificación de estimaciones de costo capital [217,218].

Clase	Tipo de estimación	Descripción	Rangos de precisión
5	Estimación del orden de magnitud (también Relación/Viabilidad)	Basado en información limitada. Prueba de concepto.	Bajo: -20% a -50% Alto: +30% a +100%
4	Estimación del estudio (también importante Equipo/Factores)	Lista de equipos principales. Proyección de proyectos, evaluación de viabilidad, evaluación de conceptos, y aprobación preliminar del presupuesto.	Bajo: -15% a -30% Alto: +20% a +50%
3	Estimación de diseño preliminar (también Alcance)	Dimensionamiento más detallado de los equipos. Autorización, apropiación y/o financiamiento del presupuesto.	Bajo: -10% a -20% Alto: +10% a +30%
2	Estimación definitiva (también Control de Proyecto)	Especificación preliminar de todos los equipos, servicios públicos, instrumentación, eléctricos y fuera de sitio. Control o Bid/Tender.	Bajo: -5% a -15% Alto: +5% a +20%
1	Estimación detallada (también Firma/Contratista)	Ingeniería completa del proceso y sitios externos relacionados y servicios requeridos.	Bajo: -3% a -10% Alto: +3% a +15%

	Verifique Estimado o Oferta/Oferta.	
--	-------------------------------------	--

El equipo necesario para la construcción de la planta es el núcleo de la mayoría de las estimaciones de costos. Lo mejor para el costo de compra de una pieza de equipo es la cotización de un vendedor actual. Datos previamente comparados pero equipos similares son el mejor siguiente [218]. Cuando los costos de un componente son pero su capacidad difiere de la del componente a estimar, los costos pueden ser más o menos estimados utilizando la correlación:

$$\frac{C_a}{C_b} = \left(\frac{A_a}{A_b}\right)^n \quad (5.16)$$

donde C y A representan respectivamente los costos de compra y dimensión, del equipo o componente requerido (C_a y A_a) y el componente conocido (C_b y A_b) y n es el exponente usado para correlacionar los costos. Este exponente n difiere por tipo de equipo, pero a menudo es cercano a 0.6 para la industria química. Por lo tanto este método de la extrapolación se refiere a veces como la regla de los seis decimales. Proporciona sólo aproximaciones cercanas de los costos reales. En caso de que no se conozcan los costos de equipos comprados, pero los detalles técnicos estén disponibles, los costos pueden ser estimados usando las correlaciones de costos de equipos.

El costo (en US\$) de los componentes en el ciclo se estimó en base a las correlaciones encontradas en la literatura. Para las correlaciones que se encuentran en euros se utiliza un factor de conversión de euro a dólar de 1.2 para convertir los costos de los componentes en dólares americanos.

Los parámetros económicos necesarios en la correlación de costos para los subsistemas ORC y TAR se enumeran en la Tabla 24. Para los intercambiadores de calor, el factor de corrección de presión se obtuvo por interpolación lineal entre los valores reportados por Smith [219]. Los costos de los componentes se convirtieron a valores de 2018 mediante el uso del Índice de costos de planta de ingeniería química (CEPSI).

Tabla 24. Correlaciones de costo para los equipos

Componente	Medida de cap.	Tamaño del rango	Correlación de costo	Ref
Bomba centrífuga	W_B [kW]	4-700 [kW]	$C_B = 10064 \left(\frac{W_B}{4}\right)^{0.68}$	[219]
Turbina	W_T [kW]	50-600 [kW]	C_{turb} $= 1.230 \times 10^6 \left(\frac{1}{2}\right)^{0.5} \left(\frac{\sqrt{V_6}/(\Delta h_{is})^{0.25}}{0.18}\right)^{1.1}$	[185]
Generador	W_G [kW]	50-1000 [kW]	$C_G = 3808 \left(\frac{W_B}{4}\right)^{0.68}$	[219]
Intercambiador de calor de	A [m ²]	80-1000 [m ²]	$C_{HX} = 30618 \left(\frac{A_i}{80}\right)^{0.68}$	[219]

tubos y coraza				
Intercambiador de calor de placas	A [m ²]	-	$C_{HX} = 736.2(A)^{0.8}$	[220]
Torre de enfriamiento húmeda	Q _{CT} [kW]	-	$C_{CT} = \dot{Q}_{CT} \times (64435 \times \dot{Q}_{CT}^{-0.2405})$	[221]

El costo capital del subsistema ORC se determina de la siguiente forma:

$$C_{ORC} = \sum_i (f_M, f_p, f_p) C_{ORC,E,i} \quad (5.17)$$

El costo capital del subsistema TAR se determina de la siguiente forma:

$$C_{TAR} = \sum_i (f_M, f_p, f_p) C_{TAR,E,i} \quad (5.18)$$

El costo de capital del subsistema deshidratador de jitomate se estimó de acuerdo a los costos generados por la construcción del deshidratador de fruta piloto construido en 1995 en el campo geotérmico de los azufres [222], los costos se actualizaron y escalaron a las dimensiones del deshidratador de jitomate considerado.

$$C_{DH} = C_{Vent} + C_{HX} + C_{TC} + C_{Const} + C_{ByB} \quad (5.19)$$

El costo capital total para el sistema en cascada se obtuvo como la suma del costo capital individual del pozo geotérmico, del ORC, del TAR y del sistema de deshidratación, así como otros costos adicionales relacionados con la compra de intercambiadores de calor y otros subsistemas. Basado en otros casos reportados, se asumió un 25 % más del costo capital para cubrir los subsistemas adicionales. Por lo tanto, el costo total de inversión del sistema de cascada geotérmica está dado por:

$$C_{TOT} = (C_{WELL} + C_{ORC} + C_{TDC} + C_{DH}) \quad (5.20)$$

La inversión total debe estar anualizada, incluyendo la vida útil esperada del sistema y la tasa de interés a tener en cuenta del valor del dinero en el tiempo. El costo de inversión anual se puede obtener usando Ec. (4.15). Para este estudio, se consideraron una tasa de interés del 10 % y una vida útil de 25 años.

Los productos del sistema en cascada geotérmica representan una oportunidad de obtener ganancias económicas. Es posible tener ingresos del comercio de la potencia eléctrica generada, en el ahorro de energía eléctrica no consumida por el subsistema de refrigeración y la venta del jitomate deshidratado. Con el fin de estimar estos ingresos, ya que el análisis económico se realizó sobre una base anual, es necesario determinar las cantidades de energía eléctrica generada, la energía eléctrica no consumida por la refrigeración y la cantidad de jitomate deshidratado y sus ingresos correspondientes.

La electricidad anual total generada se estimó utilizando la ecuación (5.21). Se asumió un factor de disponibilidad del equipo de 90 %, dando 7884 horas de tiempo de operación efectivo (t_{op}) durante todo

el año. Los ingresos esperados del comercio de electricidad se calcularon utilizando la ecuación (5.22). Se asumió un precio de la electricidad de 0.08 US\$ por kWh (UC_{EL}) [221].

$$EW_{ANUAL} = \dot{W}_E \cdot t_{op} \quad (5.21)$$

$$IN_{EL} = UC_{EL} \cdot EW_{ANUAL} \quad (5.22)$$

Teniendo la cantidad de electricidad que gastaría un sistema eléctrico para generar la refrigeración producida por el sistema de absorción anualmente, estimada a partir de ecuación (5.23), los ingresos previstos considerando el ahorro de energía eléctrica consumida se pueden calcular utilizando la Ecuación (5.24) De acuerdo con el mercado mexicano, se espera un ingreso de 0.104 US\$ por kW que se evita consumir (UC_{ELA}) [221].

$$W_{EA,A} = \dot{W}_{EA} \cdot t_{op} \quad (5.23)$$

$$IN_{TDC} = UC_{ELA} \cdot \dot{W}_{EA,A} \quad (5.24)$$

El jitomate deshidratado producido, los ingresos esperados por venderlo y los gastos por producirlo se estiman utilizando las Ecuaciones (5.24-5.28), respectivamente. En este estudio, se asumió un ingreso de 4.5 US\$ por kg de jitomate deshidratado (UC_{JD}). El factor de disponibilidad del deshidratador se considera de 80 % lo que da un tiempo de operación de 7008 horas, esto debido a la limpieza constante que requiere este subsistema. El gasto requerido por el subsistema se consideró en 0.4 US\$ por kg de jitomate fresco (UC_{JF}).

$$P_{D,A} = P_D \cdot t_{op} \quad (5.25)$$

$$IN_{DH} = UC_{JD} \cdot P_{D,A} \quad (5.26)$$

$$P_{F,A} = P_F \cdot t_{op} \quad (5.27)$$

$$EG_{DH} = UC_{JF} \cdot P_{F,A} \quad (5.28)$$

El flujo de efectivo se calcula a partir de los ingresos proyectados de los productos obtenidos del sistema en cascada y los gastos para costos de capitales, costos de operación y mantenimiento y jitomate fresco, dada por la Ecuaciones (5.29):

$$CF = (IN_{EL} + IN_{TDC} + IN_{JDH}) - (C_{Anual} + C_{OM} + EG_{JF}) \quad (5.29)$$

Para completar el modelo económico, el valor actual neto (VAN) que proporciona una estimación de la viabilidad económica del sistema de cascada geotérmica, se calculó resolviendo Ecuación (4.23),

Para realizar un comparativo económico de acuerdo a la optimización de los ciclos subcrítico y supercrítico se toma en cuenta las siguientes consideraciones: la información del análisis termodinámico de la sección 5.3.1, diseño preliminar del intercambiador de calor, la turbina axial y funciones de costo realistas basadas en ofertas de proveedores en la Tabla 24.

5.4.4 Marco de Optimización

En esta sección, el diseño de la planta de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía geotérmica se formula como un problema de optimización con el objetivo de elegir el conjunto de variables de decisión que maximizan las funciones objetivo de tal manera que se cumplan todas las restricciones. Las variables de decisión, funciones objetivo y restricciones se describen a continuación. Para esta optimización, una búsqueda de alternativas de optimización de enfoque simple se utiliza, en donde cada variable de decisión se ajusta sistemáticamente mientras las otras se mantienen constantes con el fin de explorar completamente el espacio de diseño. Durante el procedimiento de optimización, el rendimiento del sistema se simula en cada combinación de variables de decisión, y el valor de las funciones objetivo, así como se registran el alcance de las violaciones a las restricciones.

5.4.4.1 Variables de decisión

En esta optimización, las principales variables de decisión se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Variables de decisión

Subsistema ORC			
Variable	Descripción	Inferior	Superior
ΔT_{ORC}	Diferencia de temperatura de entrada/salida del ORC	10	60
$PPTD_{ev}$	Diferencia de temperatura pinch point del evaporador [°C]	3	15
$PPTD_{cond}$	Diferencia de temperatura pinch point del condensador [°C]	3	15
T_5	Presión de evaporación/presión supercrítica [bar]	1.05	1.5
P_e	Presión de evaporación subcritica [bar]	$P(T_9+30)$	$0.9 \cdot P_C$
T_c	Temperatura de condensación [bar]	T_9+5	T_9+20
ΔT_s	Sobrecalentamiento [°C]	1	20
Subsistema de Absorción			
P_h	Presión alta del ciclo de simple y medio efecto [bar]	Optimizada	
P_l	Temperatura Intermedia del ciclo [bar] (Ciclo de Medio Efecto)	Optimizada	
ΔT_{TAR}	Diferencia de temperatura de entrada/salida del TAR	10	50
Subsistema de deshidratación			
ΔT_{HX}	Diferencia de temperatura de entrada/salida del HX	20	40

Funciones objetivo

En este análisis, el rendimiento global del sistema, del ORC y de la máquina de enfriamiento así como la potencia específica del ORC se eligen como la funciones objetivo, ya que son aplicables a todos los tipos de plantas de energía geotérmica y es fundamental para determinar la viabilidad de un diseño de la planta de energía geotérmica. El cálculo de la producción de trabajo específico y de las eficiencias se logra a través de la simulación termodinámica del sistema en el paquete de software EES®. Este paquete de software realiza un cálculo preciso de las propiedades termodinámicas intrínsecas tales

como entropía, entalpía, presión de saturación, y la temperatura de saturación de la ecuación no lineal de correlaciones del estado para cada uno de los fluidos de trabajo en estudio. También se consideran dos funciones objetivo más, estas son del tipo económico, el VAN y el costo de inversión, el VAN se maximiza y el costo de inversión se minimiza.

Restricciones

En una planta de energía geotérmica, hay cuatro limitaciones reales que se deben cumplir para garantizar la operación efectiva de la planta. El primero de ellos es un límite inferior en la calidad del vapor que sale de la turbina, lo que impide un daño agresivo a los álabes de la turbina: $x = 0.95$. La temperatura de secado del jitomate se debe mantener por encima de 45 °C y por debajo de 65 °C, esto debido a que el rango de temperatura ideal para el crecimiento bacteriano está entre 25 °C y 45 °C y el producto puede perecer si la temperatura supera los 65 °C.

5.5 Resultado y discusión

Con el fin de lograr el óptimo rendimiento del sistema de poligeneración alimentado con energía geotérmica de mediana y baja entalpía. En el sistema de poli-generación, se realizó la optimización empleando el algoritmo genético (GA) para encontrar el rendimiento óptimo del sistema. Siguiendo el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 72, todas las suposiciones, restricciones, ecuaciones y correlaciones de las Tablas 21 a la Tabla 24 se escribieron y codificaron utilizando el software EES® y se optimizaron en Matlab. Los resultados de las simulaciones se presentan en esta sección. En primer lugar, todas las combinaciones de fluidos de trabajo y ciclos posibles del subsistema ORC, junto con las tecnologías de enfriamiento para el sistema de poligeneración se analizan y comparan en función de la temperatura disponible que es de 80-150 °C en este estudio. En segundo lugar, se determina la influencia de la temperatura del recurso geotérmico en las tecnologías térmicas adecuadas para cada disposición, todos los arreglos se seleccionaron a diferentes temperaturas del recurso geotérmico en el rango de 80 °C a 150 °C.

La Figura 73 muestra el efecto del pinch-point del evaporador del subsistema ORC sobre el costo de inversión y la eficiencia exergetica del subsistema para las alternativas de ORC simple, con IHE y con extracción en la turbina respectivamente. Se puede observar que la eficiencia exergetica para las tres alternativas aumenta conforme el pinch-point se reduce, el costo de inversión también aumenta conforme el pinch-point se reduce haciéndose más evidente a partir de los 10 °C, también se puede observar la proporción de las eficiencias exergeticas y costos de inversión para cada alternativa con respecto de las otras, así se puede determinar que las alternativas recomendadas son el ORC simple y con IHE, ya que la alternativa de ORC simple tiene bajos costo de inversión y eficiencias aceptables y la alternativa de ORC con IHE tiene un aumento aceptable en los costos de inversión de aproximadamente 5.6 % y un buen aumento en las eficiencias exergeticas de aproximadamente 15.9 %, mientras que la alternativa con extracción en la turbina tiene un considerable aumento en los costos de inversión de aproximadamente 12.8 % y un limitado aumento de las eficiencias exergeticas de aproximadamente 5.5 %.

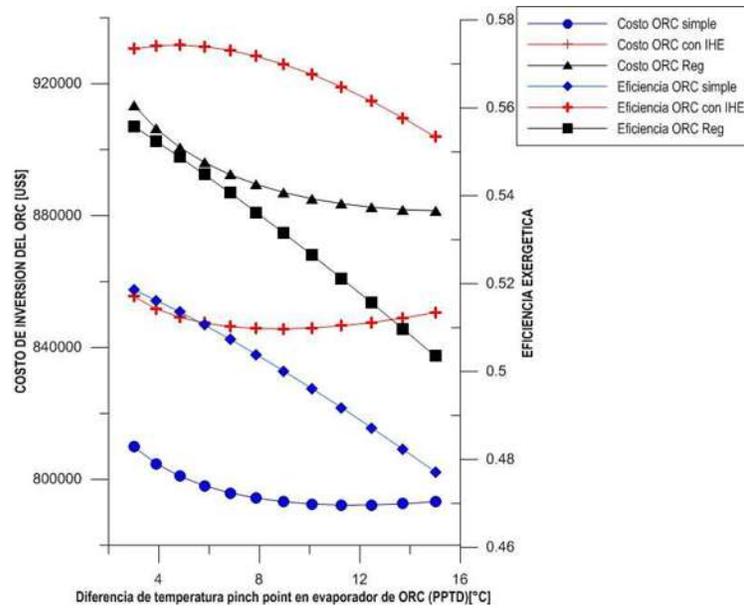


Figura 73. Efecto del pinch-point del evaporador en la eficiencia exergetica y el costo de inversión.

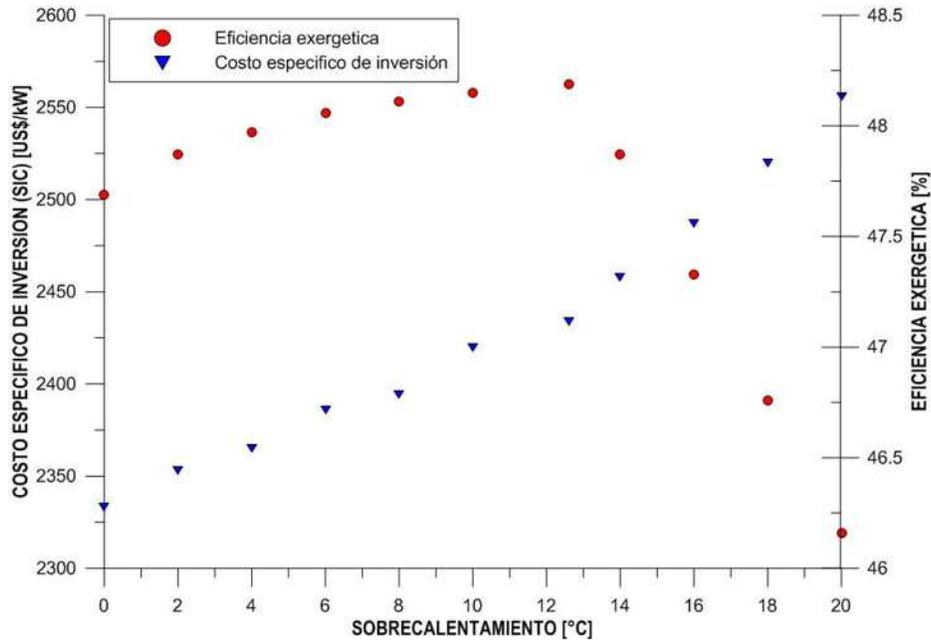


Figura 74. Efecto del sobrecalentamiento en el subsistema ORC en la eficiencia exergetica y el (SIC).

La Figura 74 muestra el efecto del sobrecalentamiento en el subsistema ORC sobre el costo de específico de inversión (SIC) y la eficiencia exergetica del subsistema. Se puede observar que la eficiencia exergetica aumenta conforme el sobrecalentamiento incrementa hasta cierto punto después de este punto máximo la eficiencia decae de manera drástica, el costo específico de inversión también aumenta conforme el sobrecalentamiento se aumenta, también se puede observar que la proporción de aumento de la eficiencia exergetica hasta el punto máximo es relativamente pequeña con respecto al

aumento el costo específico de inversión, 0.99% y 4.33 % respectivamente, de esta manera se determina que la alternativa de sobrecalentamiento no se recomienda para fluidos de trabajo isentrópico ni secos en los sistemas alimentados por energía geotérmica de mediana y baja entalpia. En el caso de los sistemas que utilicen fluidos de trabajo húmedos tales como R152a, R134a, R143a, R125, R41 y R717 es necesario el recalentamiento, ya que al no haber sobrecalentamiento dichos sistemas se verán limitados en la generación de potencia y por lo tanto en la competencia con otros fluidos de trabajo además de estar limitados al violar la restricción del sistema al caer la línea de expansión dentro de la zona de mezcla liquido-vapor y alcanzar calidades de vapor inferiores a 95 %.

La Figura 75 muestra la solución del frente de Pareto para el sistema de poli-generación, para evaluar la influencia de la temperatura de entrada del recurso geotérmico, a 80, 90, 100 y 110 °C. El frente de Pareto se muestra tanto para el ciclo supercrítico como el ciclo subcrítico, que son los resultados del proceso de optimización. Para $T_1 = 80 \text{ °C}$ el costo para ambos aumenta considerablemente para mayor potencia neta de salida. Mientras que para mayores temperaturas de entrada del recurso geotérmico el costo de inversión aumenta constantemente con mayor potencia neta de salida. Además, está claro que el costo del ciclo supercrítico comparado con el subcrítico es de hasta el 50% más costoso para las potencia de salida mostradas en la Figura 74. Sin embargo, la potencia neta máxima de salida puede ser considerablemente mayor. Para $T_1 = 100 \text{ °C}$ la potencia de salida neta máxima del supercrítico es un 16% más grande que el subcrítico. A su vez, este corresponde a un aumento del costo de inversión del 91%. Y así, para cada caso, es necesario un análisis financiero profundo para tener en cuenta el aumento de los costos de inversión para otras temperaturas de entrada del recurso geotérmico, el aumento de la potencia neta máxima de salida para el supercrítico es menos pronunciada. También vemos que el costo de inversión mínimo depende en gran medida de la entrada de la temperatura del recurso geotérmico. Para los ciclos supercríticos el intercambiador es alto, por lo tanto, el aumento del área de intercambio de calor necesario, resultando en un gran costo. Como resultado, los ciclos supercríticos no son necesariamente la solución más rentable en tamaños pequeños e instalaciones de baja temperatura.

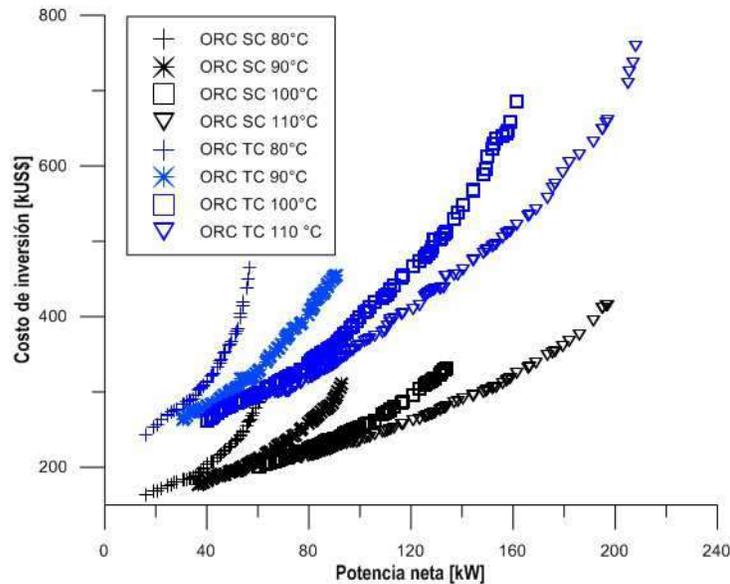


Figura 75. Frente de Pareto de costo de inversión vs potencia neta de salida de ciclos supercríticos y subcríticos.

La Figura 76 presenta el comportamiento de los fluidos de trabajo considerados en este trabajo en función de la temperatura del recurso geotérmico y del costo específico de inversión (SIC), esta grafica permite observar un criterio preliminar de cuáles son las mejores opciones para cada temperatura de entrada del recurso geotérmico, así pues se puede observar que en el rango de 80-100 °C los fluidos que mejor SIC nos dan son R125, R143a, R218 y R134a, para el rango de 100-120 °C los fluidos que mejor SIC dan son R125, R143a, R134a y R717, y finalmente para el rango de 120-150 °C los fluidos que mejor SIC dan son R152a, R143a, R245fa y R717.

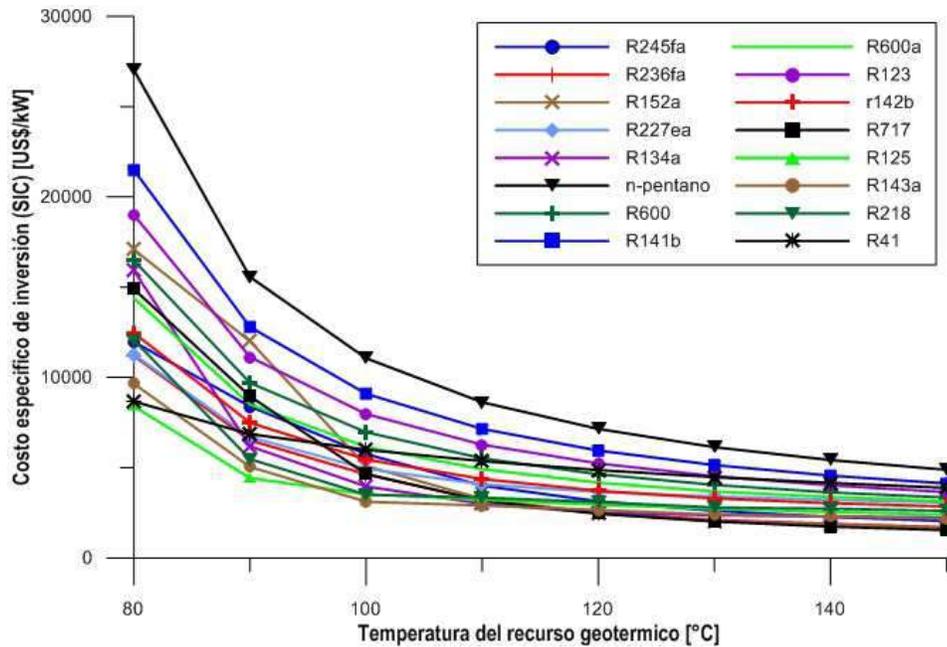


Figura 76. Costo específico de inversión vs temperatura del recurso geotérmico.

En la Figura 77 se presenta la solución del frente de Pareto óptimo para las siguientes condiciones: temperatura del recurso geotérmico 150°C, delta de temperatura del subsistema ORC 60 °C, deltas de temperaturas del subsistema TAR de 10-20 °C y en el subsistema deshidratador 20-30 °C respectivamente, para las funciones objetivo eficiencia exergética y VAN, de acuerdo al frente de Pareto se determina que las combinaciones de fluidos de trabajo y tecnologías que mejores son las conformadas por ORC con IHE y fluidos de trabajo R152a y 236fa en combinación con los sistemas de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O y NH₃-H₂O respectivamente con delta de temperatura de 10 °C y en el subsistema deshidratador un delta de 30 °C. El sistema óptimo bajo estas condiciones es un subsistema ORC con IHE, R152a como fluido de trabajo en combinación con un subsistema de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O, los resultados son un VAN de 13,268,278 US\$ y una eficiencia exergética de 52.43 %.

En la Figura 78 se presenta la solución para las funciones objetivo de la eficiencia exergética y costo de inversión bajo las mismas condiciones presentadas para la Figura 76, de acuerdo con la solución se determina que las mejores combinaciones de fluidos de trabajo y tecnologías son las integradas por un subsistema ORC simple y con IHE, R152a, R134a y 236fa como fluidos de trabajo en combinación con los sistemas de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O y NH₃-H₂O respectivamente, con un delta de temperatura de 10 °C y en el subsistema deshidratador un delta de 30 °C. El sistema óptimo en estas

condiciones está integrado por un subsistema ORC con IHE y el R152a como fluido de trabajo, un subsistema de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O, con un costo de inversión de 1,582,819 US\$ y una eficiencia exergetica de 52.43 %.

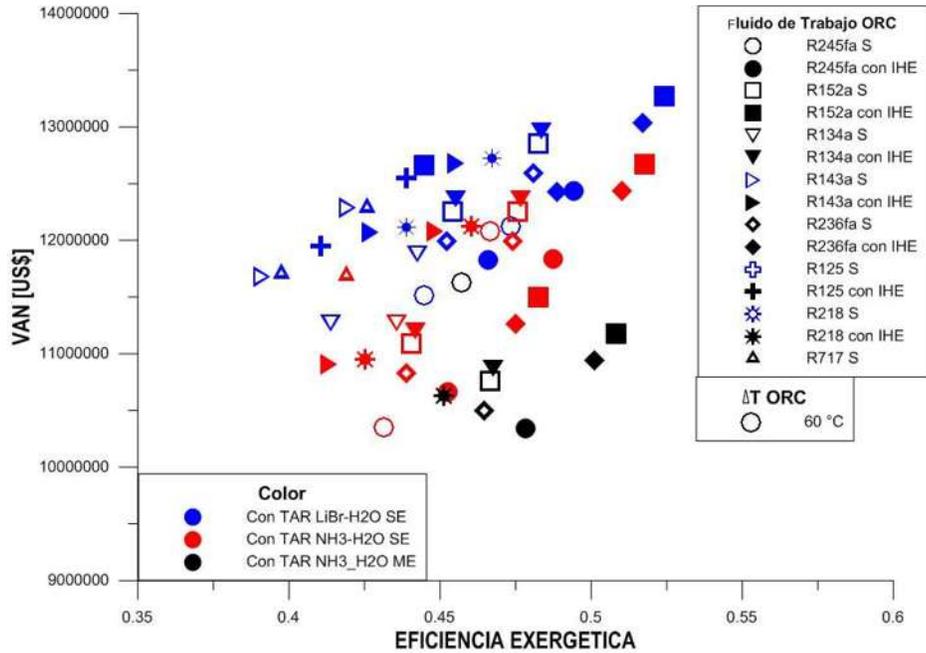


Figura 77. Eficiencia exergetica vs VAN, $\Delta T_{ORC}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y recurso geotérmico a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

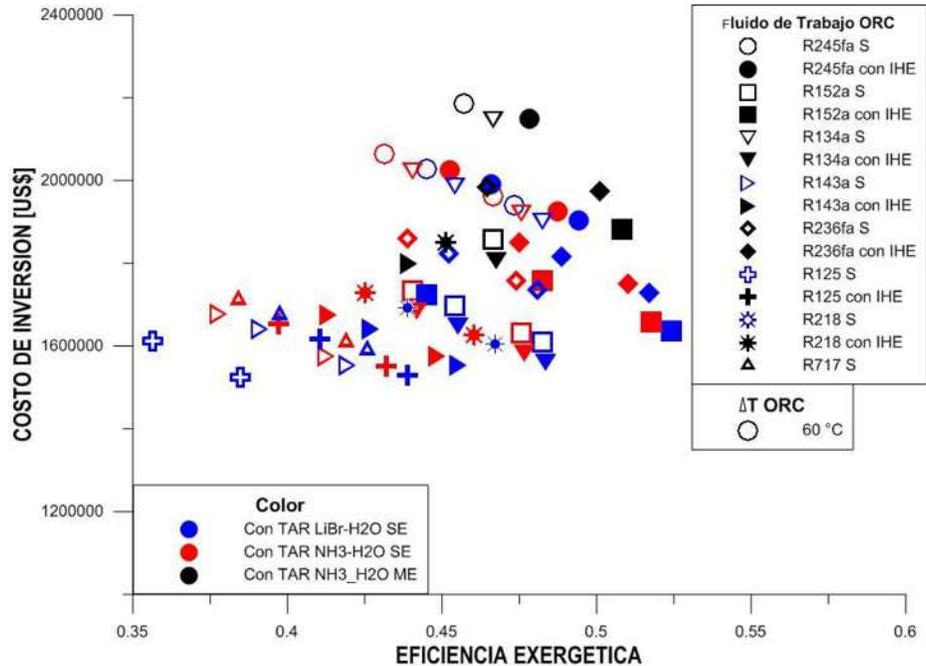


Figura 78. Eficiencia exergetica vs costo de inversión, $\Delta T_{ORC}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y recurso geotérmico a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La solución para las funciones objetivo eficiencia exergética y VAN, para la temperatura del recurso geotérmico de 150°C se presenta en la Figura 79, de acuerdo a las siguientes condiciones: delta de temperatura en el subsistema ORC 50 °C, deltas de temperaturas del subsistema TAR de 10-30 °C y en el subsistema deshidratador 20-40 °C respectivamente, las mejores combinaciones de fluidos de trabajo y tecnologías son las conformadas por R152a, 236fa y R245fa con IHE en combinación con los sistemas de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O con un delta de 10 °C y un delta de 40 °C en el subsistema deshidratador. Hay dos sistemas óptimos en estas condiciones: uno integra un subsistema ORC con IHE y R152a como fluido de trabajo y el otro con 236fa como fluido de trabajo, ambos combinados con un subsistema de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O, con un VAN de 15,952,706 US\$ y una eficiencia exergética de 52.48 % y un VAN de 15,899,709 US\$ y una eficiencia exergética de 53.11 % respectivamente.

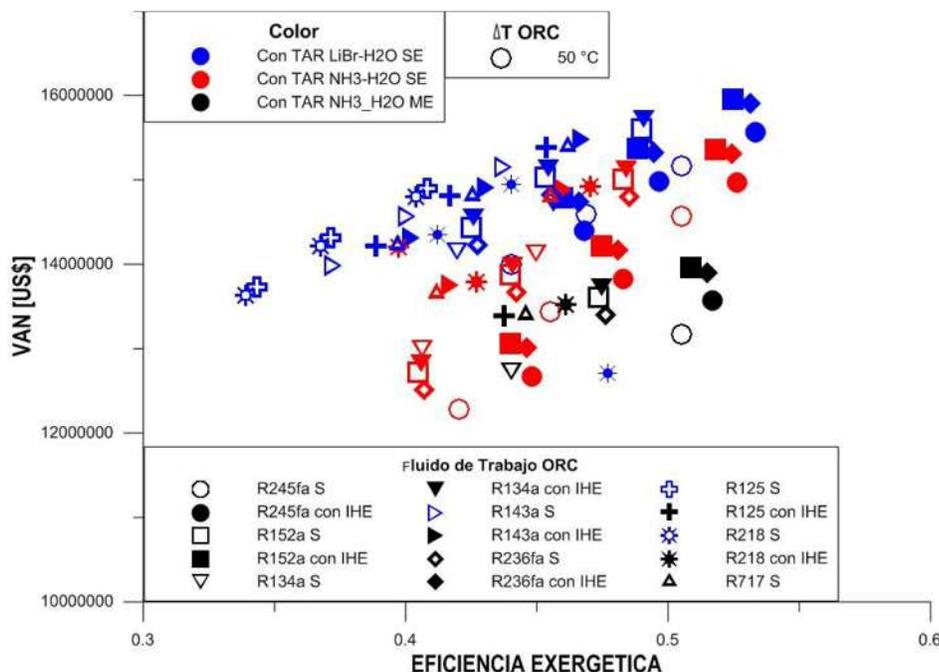


Figura 79. Eficiencia exergética vs VAN, $\Delta T_{ORC}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y recurso geotérmico a 150 °C.

En la Figura 80 se presenta la solución para la temperatura del recurso geotérmico de 150°C, para las funciones objetivo de la eficiencia exergética y costo de inversión, bajo las mismas condiciones de la Figura 79 de acuerdo a esto se determina que las mejores combinaciones de fluidos de trabajo y tecnologías son las integradas por un subsistema ORC con IHE con fluidos de trabajo R152a, 236fa y R245fa en combinación con los sistemas de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O con un delta de 10 °C de y un delta de 40 °C en el subsistema deshidratador. Los sistemas óptimos bajo estas condiciones son ORC con IHE y fluidos de trabajo R152a y 236fa, en combinación con un subsistema de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O, un costo de inversión de 1,569,349 US\$ y una eficiencia exergética de 52.48 % para el primer caso y un costo de inversión de 1,630,052 US\$ y una eficiencia exergética de 53.11 % para el segundo caso.

La Figura 81 presenta el frente de Pareto óptimo para la solución de las funciones objetivo de la eficiencia exergética y VAN a 150 °C, con ΔT_{ORC} 40 °C, ΔT_{TAR} de 20-40 °C y ΔT_{DH} de 20-40 °C respectivamente, de acuerdo a esta solución se determina que las mejores combinaciones son las

conformadas por un subsistema ORC con IHE, R152a, 236fa y R245fa como fluidos de trabajo en combinación con los sistemas de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O con ΔT_{TAR} de 20 °C y ΔT_{DH} de 40 °C. El sistema óptimo en estas condiciones es para el R245fa con IHE, subsistema de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O, con un VAN de 17,940,700 US\$ y una eficiencia exergetica de 51.28 %.

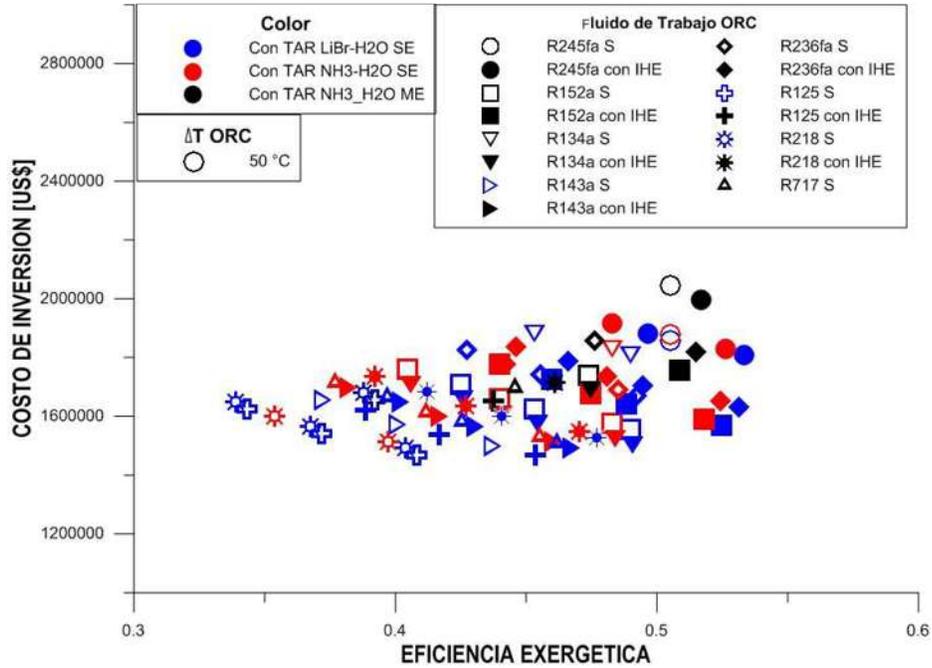


Figura 80. Eficiencia exergetica vs costo de inversión, $\Delta T_{ORC}=50$ °C y recurso geotérmico a 150 °C-

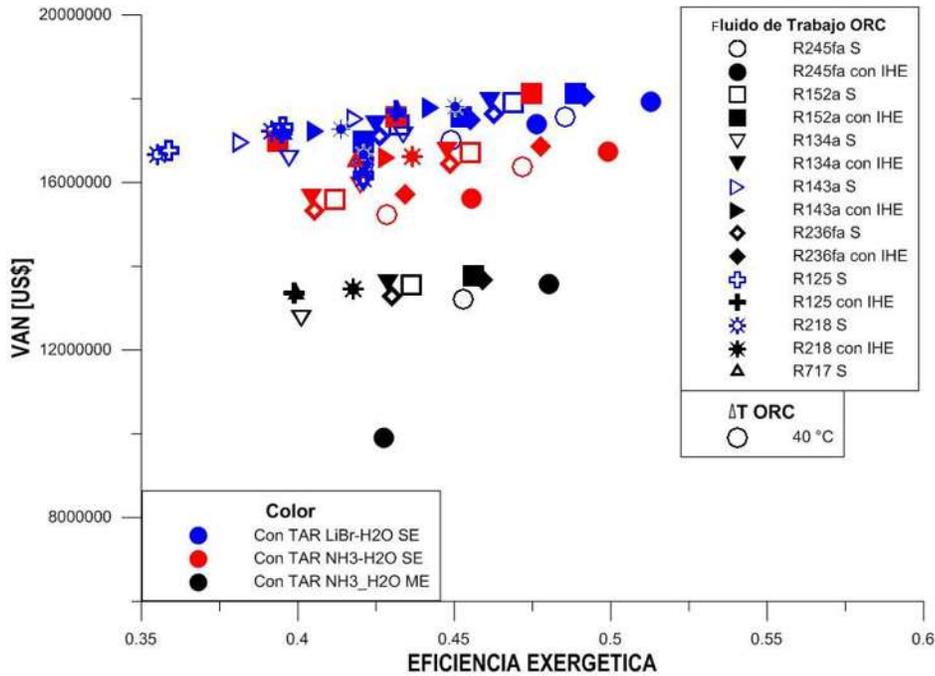


Figura 81. Eficiencia exergetica vs VAN, $\Delta T_{ORC}=40$ °C y recurso geotérmico a 150 °C.

En la Figura 82 se presenta la solución para las funciones objetivo de la eficiencia exergetica y costo de inversión bajo las mismas condiciones de la Figura 81, de acuerdo al frente de Pareto se determina que las mejores combinaciones de tecnologías y fluidos de trabajo son las integradas por ORC con IHE, con R152a, 236fa y R245fa como fluido de trabajo, en combinación con los sistemas de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O con un ΔT_{TAR} de 20 °C y un ΔT_{DH} 40 °C. El sistema óptimo en estas condiciones es para el R152a con IHE, sistema de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O, con un costo de inversión de 1, 578,985 US\$ y una eficiencia exergetica de 48.86 %.

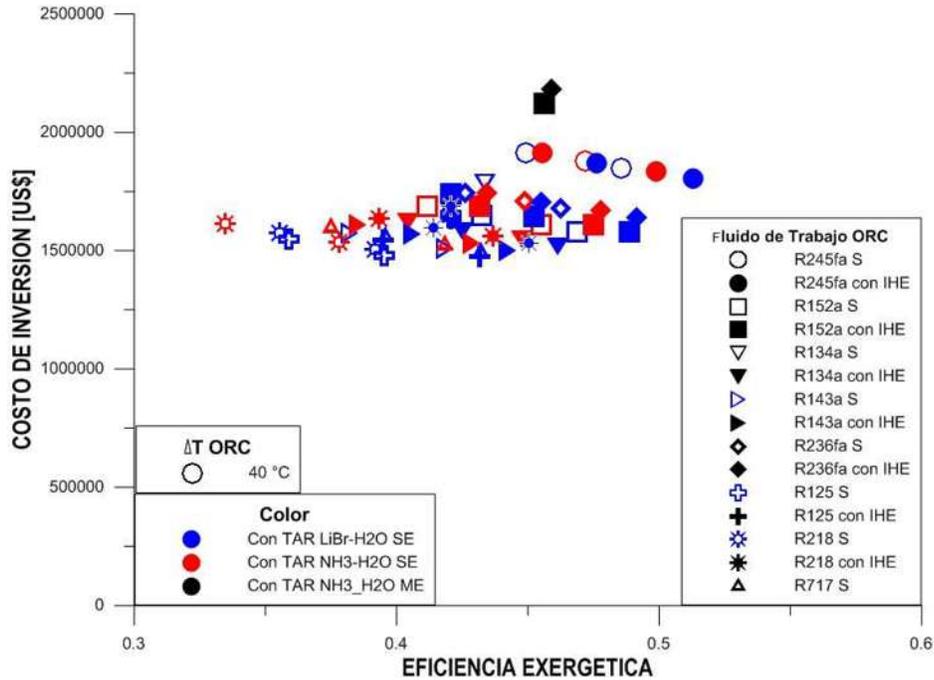


Figura 82. Eficiencia exergetica vs costo de inversión, $\Delta T_{ORC}=40$ °C y recurso geotérmico a 150 °C.

La Figura 83 presenta la solución del frente de Pareto óptimo para la temperatura del recurso geotérmico de 150°C, para las funciones objetivo de la eficiencia exergetica y VAN con un ΔT_{ORC} de 30 °C, ΔT_{TAR} de 30-50 °C y ΔT_{DH} 20-40 °C respectivamente, se determina que los mejores sistemas son los integrados por ORC con IHE, R245fa y R143a como fluidos de trabajo, en combinación con los sistemas de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O con un ΔT_{TAR} de 30 °C y un ΔT_{DH} de 40 °C. El sistema óptimo en estas condiciones es para el R245fa con IHE, LiBr-H₂O de simple efecto, con un VAN de 20,255,955 US\$ y una eficiencia exergetica de 48.51 %.

La solución para las funciones objetivo de la eficiencia exergetica y costo de inversión para la temperatura del recurso geotérmico de 150°C, ΔT_{ORC} 30 °C, ΔT_{TAR} 30-50 °C y ΔT_{DH} 20-40 °C se presenta en la Figura 84, de acuerdo al frente de Pareto se determina que las mejores opciones de fluidos de trabajo y tecnologías son las conformadas por ORC con IHE, R245fa y R143a como fluidos de trabajo en combinación con los sistemas de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O con un ΔT_{TAR} de 30 °C y un LiBr-H₂O de 40 °C. El sistema optimo en estas condiciones es para el ORC con IHE y R143a, sistema de absorción de simple efecto de LiBr-H₂O con un ΔT_{TAR} 30 °C, con un costo de inversión de 1,503,570 US\$ y una eficiencia exergetica de 47.42 %.

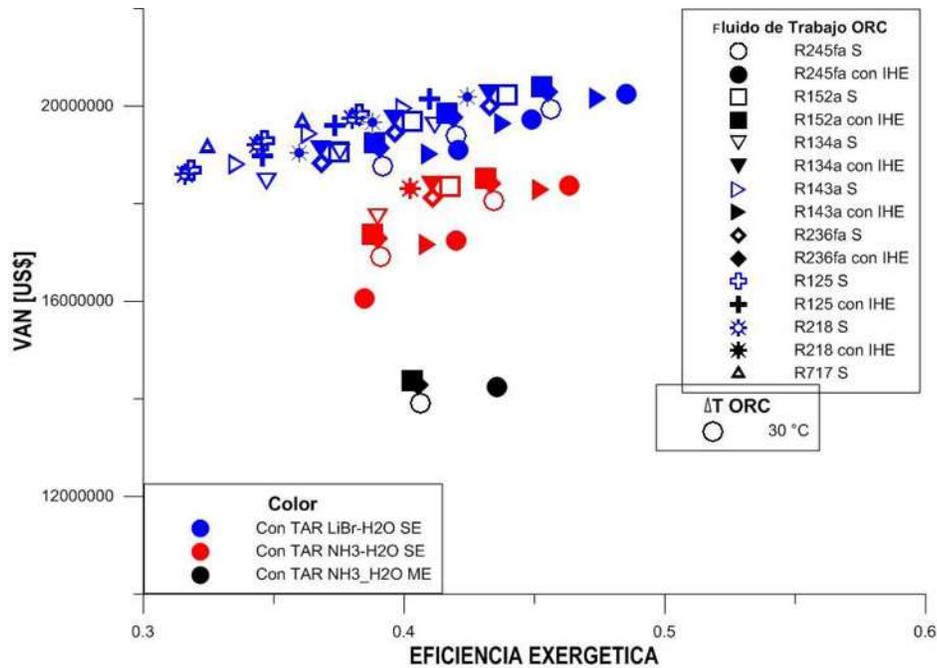


Figura 83. Eficiencia exergetica vs VAN, $\Delta T_{ORC}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y recurso geotérmico a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

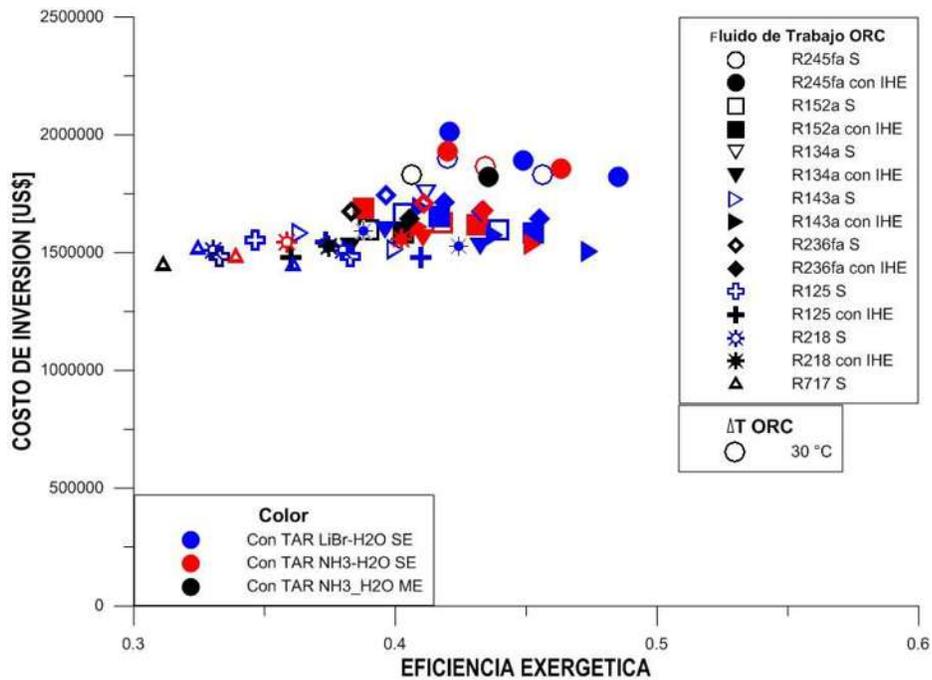


Figura 84. Eficiencia exergetica vs costo de inversión, $\Delta T_{ORC}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y recurso geotérmico a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la Figura 85 se presenta la solución del frente de Pareto óptimo para la temperatura del recurso geotérmico de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, para las funciones objetivo de la eficiencia exergetica y VAN para ΔT_{ORC} de $60\text{-}10\text{ }^{\circ}\text{C}$, ΔT_{TAR} de $10\text{-}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y ΔT_{DH} $20\text{-}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente, se puede observar que las combinaciones

con ΔT_{ORC} de 60 y 50 °C tienen mejor rendimiento exergetico y las de 40 y 30 °C los mejores valores de valor actual neto, esto se debe que a mayores ΔT_{ORC} aumenta la generación de energía eléctrica la cual se considera un producto de mejor calidad exergetica y en contraparte al disminuir los ΔT_{ORC} aumentan los ΔT_{TAR} y ΔT_{DH} por lo que aumentan los productos de estos subsistemas que tienen un mayor valor económico por lo cual justifica los mejores valores de VAN, los ΔT_{ORC} de 20 y 10 °C tienen una eficiencia muy baja por lo cual se discriminan en la optimización. De acuerdo al frente de Pareto que se observa se determina que las mejores opciones para 150 °C son las que utilizan ORC con IHE y fluidos de trabajo R245fa, R152a, R236fa respectivamente y TAR de simple efecto de LiBr-H₂O y NH₃-h₂O. La planta de poligeneración que nos da la mejor combinación de eficiencia exergetica y VAN es un sistema de ORC con IHE, fluido de trabajo R245fa y ΔT_{ORC} 40 °C, un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O con ΔT_{TAR} de 20 °C y un ΔT_{DH} de 40 °C, con valores de 51.3 % de eficiencia exergetica y un VAN de 17,940,700 US\$.

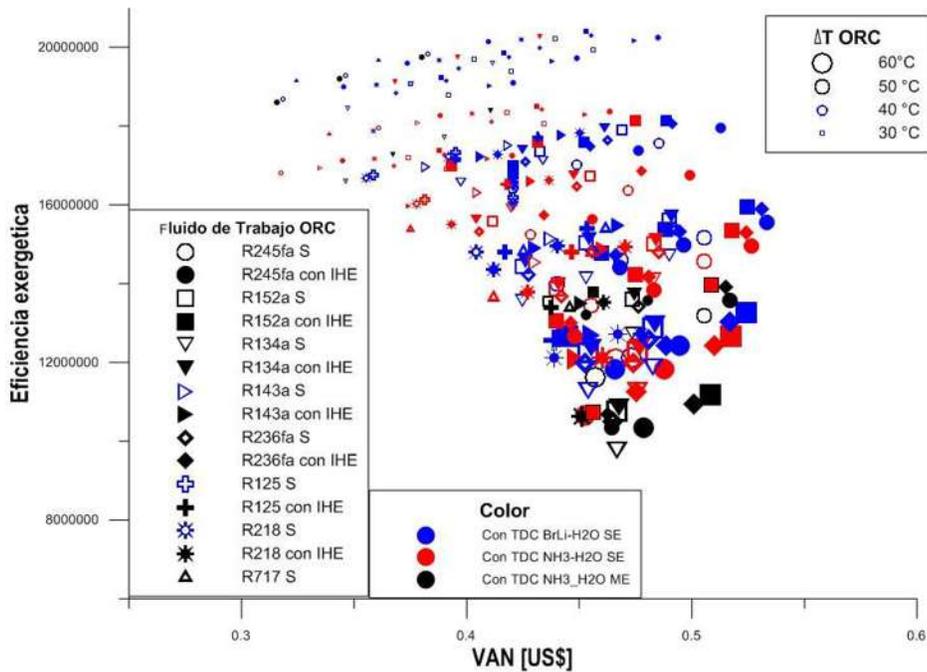


Figura 85. Eficiencia exergetica vs VAN con recurso geotérmico a 150 °C.

Para el caso de la temperatura del recurso geotérmico de 150°C, para las funciones objetivo de la eficiencia exergetica y costo de inversión se presenta la solución óptima en la Figura 86, para ΔT_{ORC} de 60-10 °C, ΔT_{TAR} de 10-50 °C y ΔT_{DH} 20-40 °C respectivamente, se puede observar que las combinaciones con ΔT_{ORC} de 60 y 50 °C tienen mejor rendimiento exergetico y las de 40 y 30 °C los valores más bajos, en el caso de los costos de inversión, los sistemas varían de manera más moderada con respecto a los deltas de temperaturas, esto se debe a que los aumentos con respecto a los deltas no son tan grandes y se mantienen dentro de los mismos rangos de costo, dentro de los sistemas que más bajos costos presentan predominan los sistemas con ΔT_{ORC} de 30 y 40 °C, los deltas de 20 y 10 °C tienen una eficiencia muy baja por lo cual se discriminan en la optimización. De acuerdo al frente de Pareto que se observa se determina que las mejores opciones para 150 °C son las que utilizan ORC con IHE y fluidos de trabajo R245fa, R152a, R236fa, R134a respectivamente y TAR de simple efecto de LiBr-H₂O y NH₃-H₂O. La planta de poligeneración que da la mejor combinación de eficiencia exergetica y costo de inversión es un sistema ORC con IHE, fluido de trabajo R152a y ΔT_{ORC} 40 °C, un TAR de

simple efecto de LiBr-H₂O con ΔT_{TAR} de 20 °C y un delta de temperatura de 40 °C en el deshidratador, con valores de 48.86 % de eficiencia exergetica y un costo de inversión de 1,578,985 US\$.

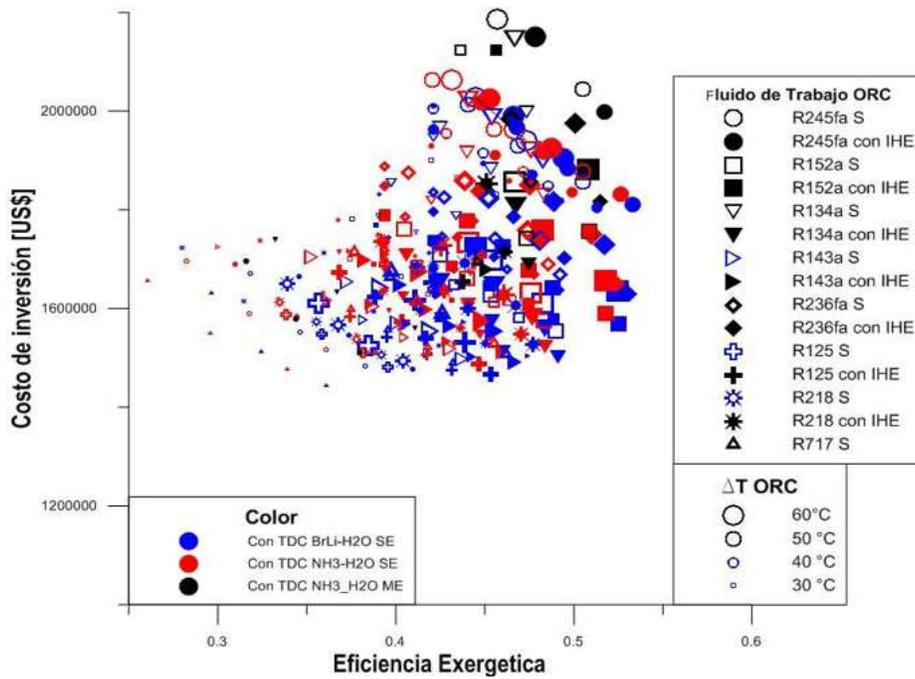


Figura 86. Eficiencia exergetica vs costo de inversión con recurso geotérmico a 150 °C.

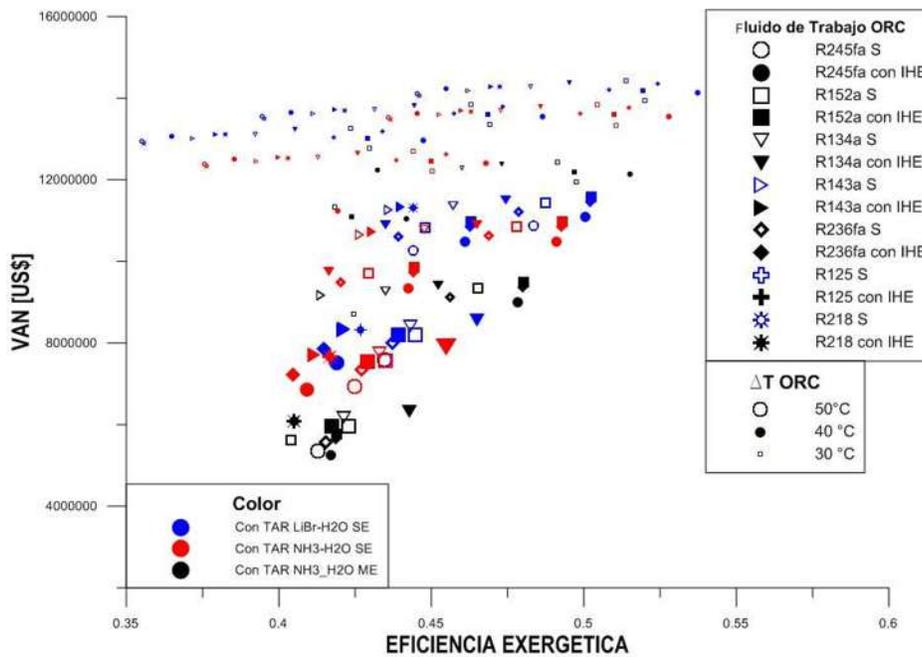


Figura 87. Eficiencia exergetica vs VAN con recurso geotérmico a 130 °C.

En la Figura 87 se presenta el frente de Pareto de la solución óptima para la temperatura del recurso geotérmico de 130 °C, para las funciones objetivo de la eficiencia exergética y VAN, para ΔT_{ORC} de 50-10 °C, ΔT_{TAR} de 10-50 °C y ΔT_{DH} 20-40 °C respectivamente, se presenta que las combinaciones con ΔT_{ORC} de 30 °C tienen mejor rendimiento exergético y los mejores valores de VAN, esto se debe que coinciden los puntos más eficientes para los subsistemas del sistema de poligeneración, los ΔT_{ORC} de 20 y 10 °C tienen una eficiencia muy baja por lo cual los discrimina la optimización. De acuerdo a la Figura 87 se determina que las mejores opciones para 130 °C son las que integran ORC con IHE y fluidos de trabajo R245fa, R152a, R236fa respectivamente y TAR de simple efecto de LiBr-H₂O y NH₃-H₂O. La planta de poligeneración que da la mejor combinación de eficiencia exergética y VAN bajo estas condiciones es un sistema de ORC con IHE, fluido de trabajo R245fa y ΔT_{ORC} de 30 °C, un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O con ΔT_{TAR} de 10 °C y un ΔT_{DH} de 40 °C, con valores de 53.74% de eficiencia exergética y un VAN de 14,136,672 US\$.

En la Figura 88 se presenta la solución óptima para la temperatura del recurso geotérmico de 130°C, para las funciones objetivo de la eficiencia exergética y costo de inversión para ΔT_{ORC} de 50-10 °C, ΔT_{TAR} de 10-50 °C y ΔT_{DH} 20-40 °C respectivamente, se puede observar que las combinaciones con ΔT_{ORC} de 50 °C tienen mayor costo de inversión que los de 40 y 30 °C respectivamente, en el caso de la eficiencia exergética los sistemas tienen valores similares para los tres casos. De acuerdo al frente de Pareto se determina que las mejores opciones para 130 °C son las que utilizan ORC simple con R152a y ORC con IHE con R245fa, R236fa, R134a fluidos de trabajo respectivamente y TAR de simple efecto de LiBr-H₂O y NH₃-h₂O. Las plantas de poli-generación que dan las mejores combinaciones de eficiencia exergética y costo de inversión son los sistemas integrados por ORC simple, fluido de trabajo R152a y ORC con IHE, fluido de trabajo R236fa con ΔT_{ORC} de 30 °C, un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O con ΔT_{TAR} de 10 °C y un delta de temperaturas de 40 °C en el deshidratador, con valores de 51.37 % de eficiencia exergética y costo de inversión de 1,491,916 US\$ y de 52.42 % de eficiencia exergética y costo de inversión de 1,566,135 US\$ respectivamente.

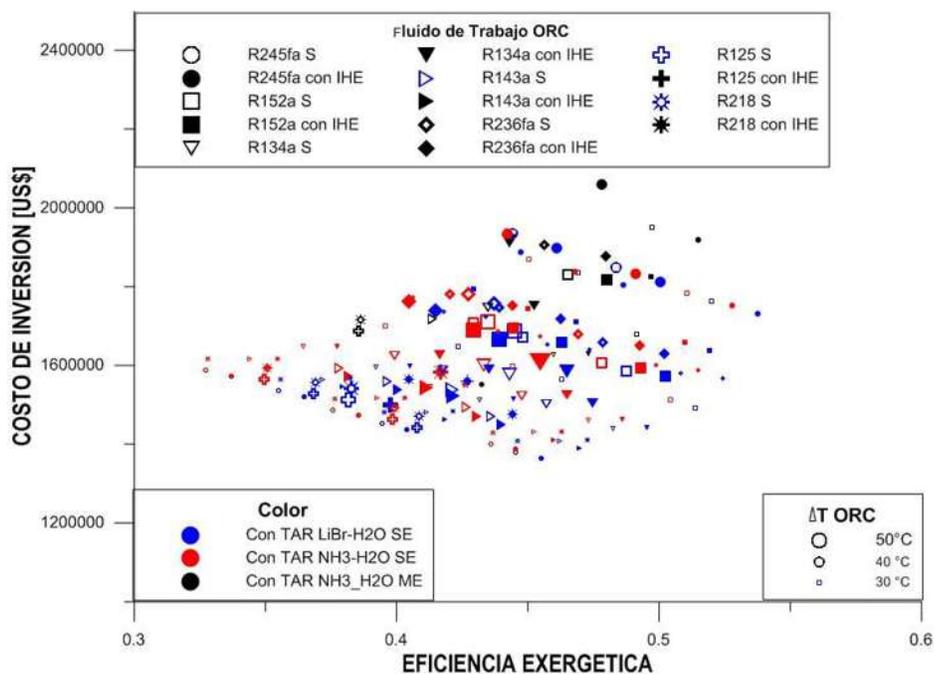


Figura 88. Eficiencia exergética vs costo de inversión con recurso geotérmico a 130 °C.

La solución óptima para la temperatura del recurso geotérmico de 110°C, para las funciones objetivo de la eficiencia exegética y VAN para ΔT_{ORC} de 30-10 °C, ΔT_{TAR} de 10-30 °C y en el subsistema deshidratador 20-40 °C respectivamente se muestran en la Figura 89, para este caso se puede observar que las combinaciones con ΔT_{ORC} de 20 °C tienen mejor rendimiento exergético y los mejores valores de VAN, esto se debe que coinciden los puntos más eficientes para los subsistemas del sistema de poli-generación, los deltas de 10 °C tienen una eficiencia muy baja por lo cual la optimización los discrimina. De acuerdo al frente de Pareto se determina que las mejores opciones para 110 °C son las que utilizan ORC simple y con IHE y fluidos de trabajo R245fa, R152a, R236fa respectivamente y TAR de simple efecto de LiBr-H₂O y NH₃-h₂O. Las plantas de poligeneración que dan las mejores combinaciones de eficiencia exergetica y VAN son los sistemas de ORC simple R152a y con IHE R236fa y ΔT_{ORC} de 20 °C, un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O con ΔT_{TAR} de 10 °C y un delta de temperatura de 30 °C en el deshidratador, con valores de 50.23 % de eficiencia exergetica y un VAN de 10,435,964 US\$ y 51.13 % de eficiencia exergetica y un VAN de 10,335,520 US\$, respectivamente.

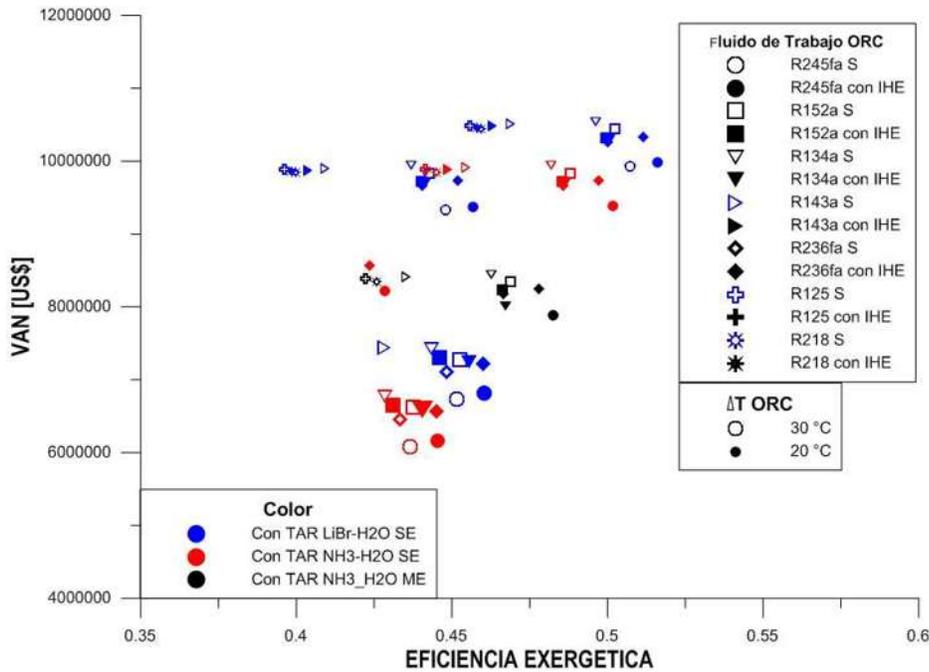


Figura 89. Eficiencia exergética vs VAN con recurso geotérmico a 110 °C.

En la Figura 90 se presenta la solución para las funciones objetivo de la eficiencia exegética y costo de inversión ΔT_{ORC} de 30-10 °C, ΔT_{ORC} de 10-30 °C y ΔT_{DH} 20-40 °C respectivamente, se puede observar que las combinaciones con ΔT_{ORC} de 30 °C tienen mayor costo de inversión que los de 20 °C, en el caso de la eficiencia exergetica los sistemas tienen valores similares para los dos casos. De acuerdo al frente de Pareto que se observa se determina que las mejores opciones para 110 °C son las que utilizan ORC simple y fluidos de trabajo R134a, R143a, R152a respectivamente y TAR de simple efecto de LiBr-H₂O. La planta de poligeneración que da la mejor combinación de eficiencia exergetica y costo de inversión es un sistema de ORC simple, fluido de trabajo R134a y delta de temperatura de 20 °C, un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O con ΔT_{TAR} de 10 °C y un ΔT_{DH} de 30 °C, con valores de 49.63 % de eficiencia exergetica y un costo de inversión de 1,415,944 US\$.

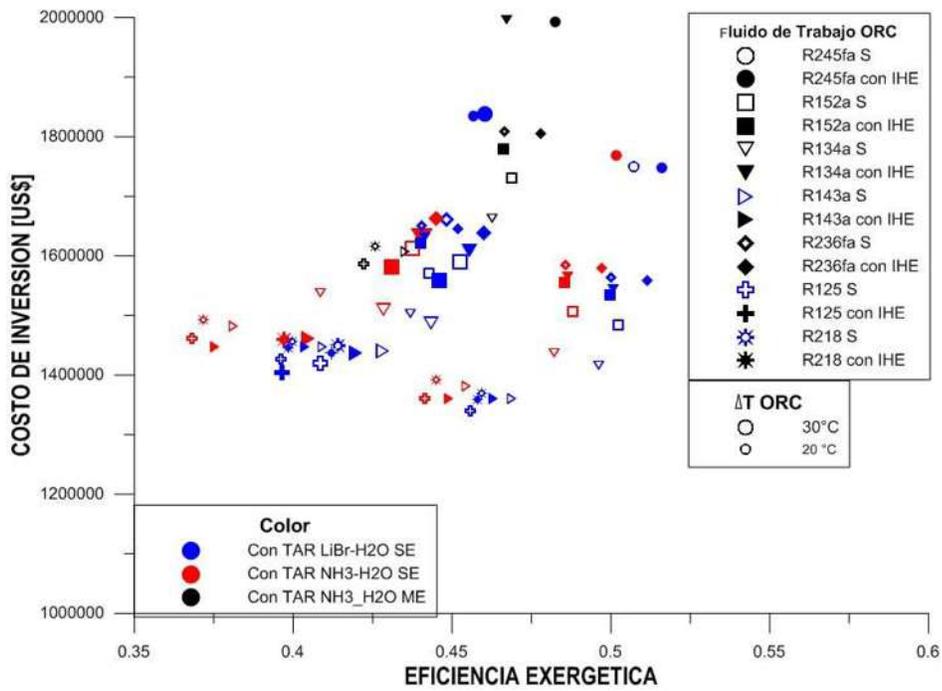


Figura 90. Eficiencia exergetica vs costo de inversión con recurso geotérmico a 110 °C.

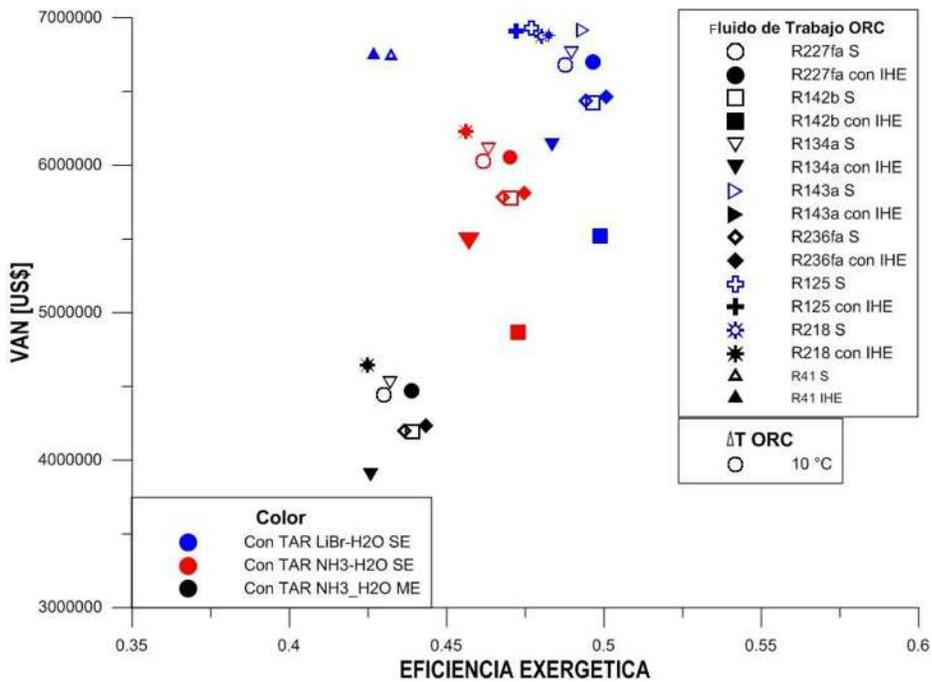


Figura 91. Eficiencia exergetica vs VAN con recurso geotérmico a 90 °C.

En la Figura 91 se presenta la solución óptima para la temperatura del recurso geotérmico de 90°C, para las funciones objetivo de la eficiencia exergetica y VAN para ΔT_{ORC} de 10 °C, ΔT_{TAR} de 10 °C y en

el subsistema deshidratador 20 °C respectivamente. De acuerdo al frente de Pareto se determina que las mejores opciones para 90 °C son las que utilizan ORC simple y con IHE con fluidos de trabajo R125, R143a, R134a y R227ea, R218 respectivamente y TAR de simple efecto de LiBr-H₂O y NH₃-h₂O. La planta de poligeneración que da la mejor combinación de eficiencia exergetica y VAN es el sistema de ORC simple R134a con ΔT_{ORC} de 10 °C, un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O con ΔT_{TAR} de 10 °C y un ΔT_{DH} de 20 °C, con valores de 49.33 % de eficiencia exergetica y un VAN de 6,915,451 US\$.

En la Figura 92 se presenta la solución para las funciones objetivo de la eficiencia exergetica y costo de inversión para las mismas condiciones de la Figura 91. De acuerdo al frente de Pareto se determina que las mejores opciones para 90 °C son las que utilizan ORC simple y fluidos de trabajo R143a, R125, R134a respectivamente y con IHE y fluidos de trabajo R227ea, R218, TAR de simple efecto de LiBr-H₂O. La planta de poligeneración que da la mejor combinación de eficiencia exergetica y costo de inversión es un sistema de ORC simple, fluido de trabajo R143a y delta de temperatura de 10 °C, un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O con delta de temperatura de 10 °C y un delta de 10 °C en el deshidratador, con valores de 49.33% de eficiencia exergetica y un costo de inversión de 1,330,534 US\$.

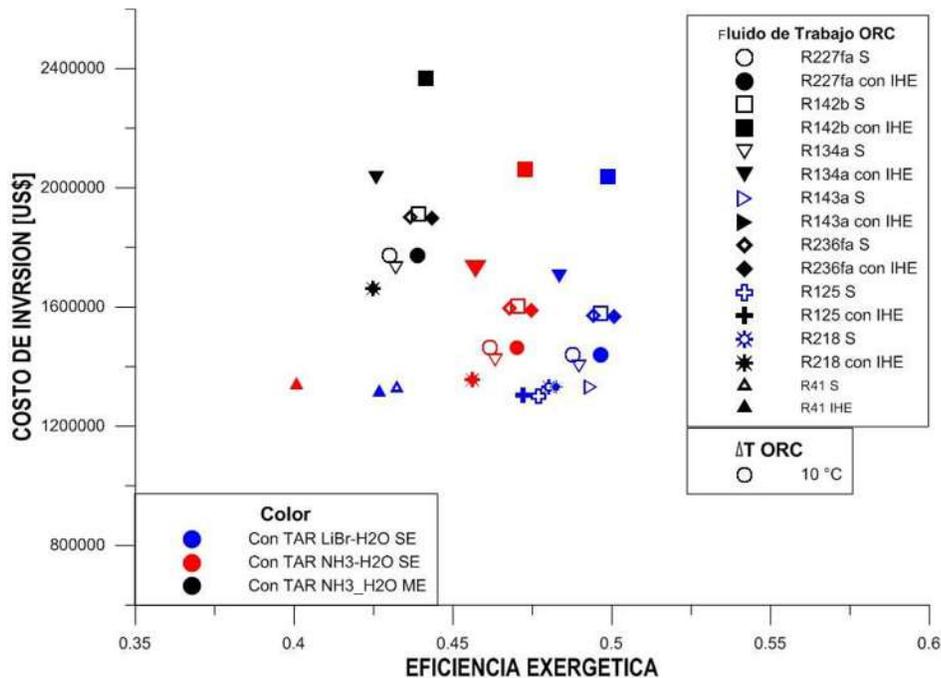


Figura 92. Eficiencia exergetica vs costo de inversión con recurso geotérmico a 90 °C.

Finalmente, en la Tabla 26 se presenta un resumen de diferentes valores de salida y parámetros de rendimiento de los sistemas óptimos para temperaturas de recursos geotérmicos de 150, 130, 110 y 90 °C para una mejor comprensión de los resultados. Como se muestra en la Tabla 26, se encuentra que los sistemas de poli-generación optimizados para cada una de las temperaturas, de acuerdo a estos resultados se puede observar que los sistemas predominantes en la optimización son a temperaturas relativamente altas, los integrados por ORC con IHE, cuando las temperaturas bajan los sistemas ORC simple son los que predominan, TAR de simple efecto de LiBr-H₂O es el sistema de absorción que mejor resultados da a lo largo del rango de temperaturas, para esta tecnología se recomiendan bajos valores de deltas de temperaturas que son las que mejores resultados dan en los tres parámetros

considerados como funciones objetivo, en conclusión los sistemas optimizados no pueden combinar las tres funciones objetivo, un VAN alto, un costo bajo y una eficiencia exergetica alta, los mejores resultados solo pueden combinar dos de estas funciones objetivo, la tercera solo se puede acercar a ser de las mejores en la nube de resultados.

Tabla 26. Resumen de sistemas óptimos para temperaturas de recursos geotérmicos de 150 °C, 130 °C, 110 °C y 90 °C.

Temperatura del recurso geotérmico		150 °C			130 °C		
ORC	Tipo	con IHE	simple				
	Fluido de trabajo	R245fa	R245fa	R236fa	R245fa	R245fa	R152a
	ΔT_{ORC} [°C]	30	40	50	30	30	30
	T_{out} [°C]	120	110	100	100	100	100
	η_{ORC} [%]	15.55	14.98	13.68	12.34	12.34	11.15
	Potencia neta [kW]	356.9	495.3	562.2	301.6	301.6	271.2
TAR	Tipo	Simple efecto	Simple efecto				
	Par de trabajo	LiBr-H ₂ O	LiBr-H ₂ O	LiBr-H ₂ O	LiBr-H ₂ O	NH ₃ -H ₂ O	LiBr-H ₂ O
	ΔT_{TAR} [°C]	30	20	10	10	10	10
	T_{out} [°C]	90	90	90	90	90	90
	$Q_{enfriamiento}$ [kW]	687.7	680	675.5	675.5	543.8	675.5
	COP	0.8072	0.8001	0.7963	0.7963	0.6441	0.7963
DH	ΔT_{DH} [°C]	40	40	40	40	40	40
	T_{out} [°C]	50	50	50	50	50	50
	Q_{DU} [kW]	343.1	343.1	343.1	343.1	343.1	343.1
	Producto [kg/día]	3788	3788	3788	3788	3788	3788
Func. Obj.	VAN [US\$]	20255955.3	17940700	15899709.4	14136671.7	13540222.8	14431373.3
	Costo de inv. [US\$]	1824177.9	1804598.5	1630052.8	1731529.3	1752536.4	1491916.2
	η_{ex} [%]	48.51	51.28	53.12	53.74	52.79	51.38
Temperatura del recurso geotérmico		110 °C			90 °C		
ORC	Tipo	con IHE	con IHE	simple	simple	con IHE	con IHE
	Fluido de trabajo	R236fa	R245fa	R152a	R143a	R227fa	R236fa
	ΔT_{ORC} [°C]	20	20	20	10	10	10
	T_{out} [°C]	90	90	90	80	80	80
	η_{ORC} [%]	9.743	9.98	9.304	6.743	7.41	7.659
	Potencia neta [kW]	156.2	160.2	148.7	56.6	58.11	60.21
TAR	Tipo	Simple efecto	Simple efecto				
	Par de trabajo	LiBr-H ₂ O	LiBr-H ₂ O				
	ΔT_{TAR} [°C]	10	10	10	10	10	10
	T_{out} [°C]	0.7938	0.7938	0.7938	0.7848	0.7848	0.7848
	$Q_{enfriamiento}$ [kW]	672.3	672.3	672.3	663.9	663.9	663.9

	COP	0.7938	0.7938	0.7938	0.7848	0.7848	0.7848
DH	ΔT_{DH} [°C]	30	30	30	20	20	20
	T_{out} [°C]	50	50	50	50	50	50
	Q_{DU} [kW]	234.5	234.5	234.5	140.8	140.8	140.8
	Producto [kg/día]	2700	2700	2700	1618	1618	1618
Funs. Obj.	VAN [US\$]	10335520.9	9981634.5	10435964.4	6915451.3	6704331.9	6466061.3
	Costo de inv.[US\$]	1558205.9	1747344	1484539.7	1330534.8	1440681.3	1566224.7
	η_{ex} [%]	51.14	51.61	50.23	49.34	49.65	50.08

5.6 Discusión y conclusiones

El objetivo de este capítulo es dar una idea de los sistemas de poligeneración con el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpia desde un punto de vista económico. Los procesos de adopción y difusión de tecnologías innovadoras están fuertemente influenciados por factores económicos. Todavía no hay mucha información publicada sobre los costos reales de los sistemas aplicados a los sistemas de poligeneración con el uso de la energía geotérmica de mediana y baja entalpia. Los proyectos geotérmicos tienden a ser más grandes con valores de SIC más bajos. Se pueden lograr altas precisiones haciendo estimaciones definitivas y detalladas, pero estas requieren un nivel de detalle de planta que comúnmente no se logra en las estimaciones de investigación.

No se recomienda utilizar extracción en la turbina en este tipo de sistemas ya que la mejora en el rendimiento es relativamente pequeña y el incremento en los costos es considerable. Otro aspecto importante a considerar para la aplicación de sistemas de poligeneración de mediana y baja entalpia es la aplicación de sobrecalentamiento en el ORC, no se recomienda para fluidos de trabajo isentrópicos ni secos ya que la mejora en el rendimiento es relativamente pequeña y el incremento en los costos es considerable, además de que se llega a un punto en el que en lugar de beneficiar al mejorar el rendimiento lo perjudica con un decaimiento drástico del rendimiento. En el caso de los sistemas que utilicen fluidos de trabajo húmedos tales como R152a, R134a, R143a, R125, R41 y R717 es necesario el recalentamiento, ya que al no haber sobrecalentamiento dichos sistemas se verán limitados en la generación de potencia y por lo tanto en la competitividad.

En el caso del uso de ciclos subcríticos y supercríticos no se recomienda utilizar ciclos supercríticos en sistemas de pequeña potencia y bajas temperaturas ya que la mejora en el rendimiento es relativamente pequeña con respecto al incremento en los costos, aproximadamente 16% y 91% respectivamente. Solo se recomienda para el caso de los sistemas que utilicen fluidos de trabajo que su temperatura crítica este muy por debajo de la temperatura del recurso geotérmico, fluidos tales como R218, R143a, R125 y R41.

Finalmente, de acuerdo a los resultados mostrados en los frentes de Pareto para las temperaturas del recurso geotérmico de 150, 130, 110 y 90 °C respectivamente, se puede concluir que las soluciones óptimas no necesariamente son las mismas para el VAN que para el costo de inversión, esto es porque el VAN depende de los gastos y ganancias de los productos generados y el costo de inversión solamente del desembolso inicial de la planta. Para una temperatura de 150 °C los deltas de temperaturas recomendados para los subsistemas son 40 °C para el ORC, 20 °C para el TAR y 40 °C para el deshidratador, ORC con IHE con fluidos de trabajo R245fa para el VAN y R152a para el costo

de inversión, en combinación un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O. Para una temperatura de 130 °C los deltas de temperaturas recomendados para los subsistemas son 30 °C para el ORC, 10 °C para el TAR y 40 °C para el deshidratador, ORC con IHE, R245fa para el VAN y ORC simple, 152a, y con IHE, R236fa para el costo de inversión, en combinación un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O. Para una temperatura de 110 °C los deltas de temperaturas recomendados para los subsistemas son 20 °C para el ORC, 10 °C para el TAR y 30 °C para el deshidratador, ORC simple, R152a y ORC con IHE, R236fa para el VAN y ORC simple, 134a para el costo de inversión, en combinación un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O. Para una temperatura de 90 °C los deltas de temperaturas recomendados para los subsistemas son 10 °C para el ORC, 10 °C para el TAR y 20 °C para el deshidratador, ORC simple, R134a para el VAN y ORC simple, 143a para el costo de inversión, en combinación un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O.

Los fluidos de trabajo recomendados para el subsistema ORC son para una temperatura del recurso geotérmico de 150 °C R245fa, R152a y R236fa, para 130 °C R245fa, R152a, R236fa y R134a, para 110 °C R245fa, R143a, R236fa y R134a, para 90 °C R227ea, R125, R218, R143a y R134a. Los subsistemas ORC simples predominan en las temperaturas por debajo de 110°C y los subsistemas ORC con IHE predominan para temperaturas por encima de 110 °C.

Por lo regular para el caso del costo de inversión predominan los sistemas con ORC simple, esto es debido a que el equipo es más pequeño lo cual impacta en costo inicial, en contra parte los sistemas con ORC con IHE predominan en el caso del VAN debido a que los sistemas son más caros pero nos redituarán en los beneficios a lo largo de la vida útil de la planta.

Es importante tener en cuenta la diferencia entre los costos y los precios en este tipo de estudios. Los costos reflejan la cantidad que se requiere para producir un determinado artículo, el precio es la cantidad que paga para comprarlo. Los costos asociados con la producción de un sistema ORC diferirán, por lo tanto, del precio pagado para adquirir ese sistema. Muchas correlaciones utilizadas para estimar los costos se obtienen utilizando los precios del proveedor.

Los resultados confirman un amplio rango de precisión. En lugar de ser utilizados como resultados exactos, estas estimaciones podrían proporcionar una guía al comparar varias alternativas, estimadas con el mismo método.

Capítulo 6. Simulación de la operación de la planta de poli-generación

6.1 Introducción

Este capítulo describe los resultados de las simulaciones que se han realizado para determinar el comportamiento esperado de la operación real de la planta de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpía. La simulación permite estimar el comportamiento del sistema y el rendimiento energético, tanto en condiciones de diseño y fuera de diseño. Es importante conocer el comportamiento de la planta en condiciones ambientales máximas y mínimas extremas, operación a cargas parciales, mal funcionamiento de equipos principales o secundarios o por oscilaciones en las características del recurso geotérmico, para poder identificar las acciones y alternativas para modificar el sistema antes de su operación o durante ella logrando un buen funcionamiento sin poner en riesgo la seguridad de la planta. Cuando las especificaciones de los equipos en el punto de diseño son consideradas en la simulación, se puede predecir la eficiencia de la planta para las condiciones ambientales y los recursos específicos. Los resultados de las simulaciones fuera de diseño de la planta se pueden utilizar para evaluar la generación de energía neta durante un período de tiempo específico después de haber definido las condiciones ambientales y el recurso. Se ha empleado el software *Engineering Equation Solver*® (EES®) para realizar las simulaciones del ciclo Rankine Orgánico (ORC), el ciclo de absorción y el sistema de deshidratación de jitomate. Por último, se realiza el modelo de la planta de poli-generación completo desarrollado para optimizar el funcionamiento de la planta y anticipar su funcionamiento con variaciones en la operación de los sistemas y algunas condiciones termodinámicas.

6.2 Fundamentos de la simulación

La incorporación de la tecnología en el análisis de los sistemas energéticos facilita la labor de los investigadores y permite nuevas posibilidades para prevenir posibles fallas y mejorar las condiciones de operación de dichos sistemas. Cuando los ingenieros y diseñadores de productos desean elaborar un nuevo prototipo, comienzan su labor empleando herramientas tecnológicas y software especializado para diseñar un modelo computacional para visualizar su idea de forma más clara. De este modo, diferentes expertos pueden observar el mismo modelo y dar su punto de vista. La simulación es una herramienta muy útil para el desarrollo de sistemas energéticos, sin embargo debe entenderse que utilizar la herramienta de simulación es un medio para reproducir un acercamiento de la realidad, más no para suplirla completamente, siempre será conveniente si se emplea de manera adecuada.

Existe buenas razones que justifican realizar en este caso la simulación:

La simulación de la planta de poligeneración se desarrolla por varias razones:

1. Analizar cálculos en estado estable de los ciclos de potencia.
2. Tener una predicción de la operación de la planta en condiciones de diseño y fuera de diseño.

3. Estudiar el comportamiento del sistema en diferentes escenarios de operación.
4. Definir y validar los procedimientos de operación de seguridad.
5. Permite adquirir una rápida experiencia a bajo costo y sin riesgos. No se compromete la confiabilidad de los sistemas en los procesos simulados. La construcción de la planta es demasiado *costosa* y el sistema que *no existe aún*.
6. Se puede Identificar en un sistema complejo aquellas áreas con posibles problema. Con la simulación todas las variables pueden ser estudiadas y controladas, incluso las que son inaccesibles para el sistema.
7. Se puede realizar un estudio sistemático de alternativas (variaciones uniformes en los parámetros que intervienen que resulta imposible de lograr en un sistema real). Utilizando la simulación, es fácil manipular los parámetros del modelo del sistema de poli-generación, incluso fuera del rango admisible del sistema físico particular.
8. Permite ensayar estrategias para enfrentar maniobras (operaciones de ataque en las llamadas maniobras imprevistas).
9. No tiene límite en cuanto a complejidad. Cuando la introducción de elementos estocásticos hace imposible un planteo analítico surge la modelización como único medio de atacar el problema. Todo sistema, por complejo que sea, puede ser modelado, y sobre ese modelo es posible ensayar alternativas.
10. Puede ser aplicada para diseño de sistemas similares nuevos en los cuales se quieren comparar alternativas muy diversas surgidas de utilización de diferentes tecnologías. Puede utilizarse, durante la vida del sistema, para probar modificaciones antes que estas se implementen (si es que los resultados de la simulación aconsejan su uso).

6.3 Descripción del sistema a simular

El sistema de poli-generación considerado para realizar la simulación es el que resulta de la optimización realizada en el capítulo anterior y que da las siguientes condiciones de diseño: temperatura del recurso geotérmico de 130 °C, un sistema de ORC con IHE, fluido de trabajo R245fa y ΔT_{ORC} de 30 °C, un TAR de simple efecto de LiBr-H₂O con ΔT_{TAR} de 10 °C y un ΔT_{DH} de 40 °C, con valores de 53.74% de eficiencia exergética, un VAN de 14,136,672 US\$. El primer paso para efectuar la simulación es la elaboración de un diagrama de flujo de información, la Figura 93 muestra el diagrama de flujo básico del sistema.

6.4 Formulación del modelo

La principal problemática del estudio de las plantas de poli-generación y su modelado es la gran cantidad de parámetros o variables en consideración, básicas para la descripción del comportamiento del sistema, y necesarias para la obtención de resultados. Teniendo en cuenta que el estudio está basado en formulaciones físicas y fenómenos no lineales, que el sistema es complejo y la cantidad de variables elevada, se ha desarrollado un modelo físico propio, basado en el estudio de los procesos que

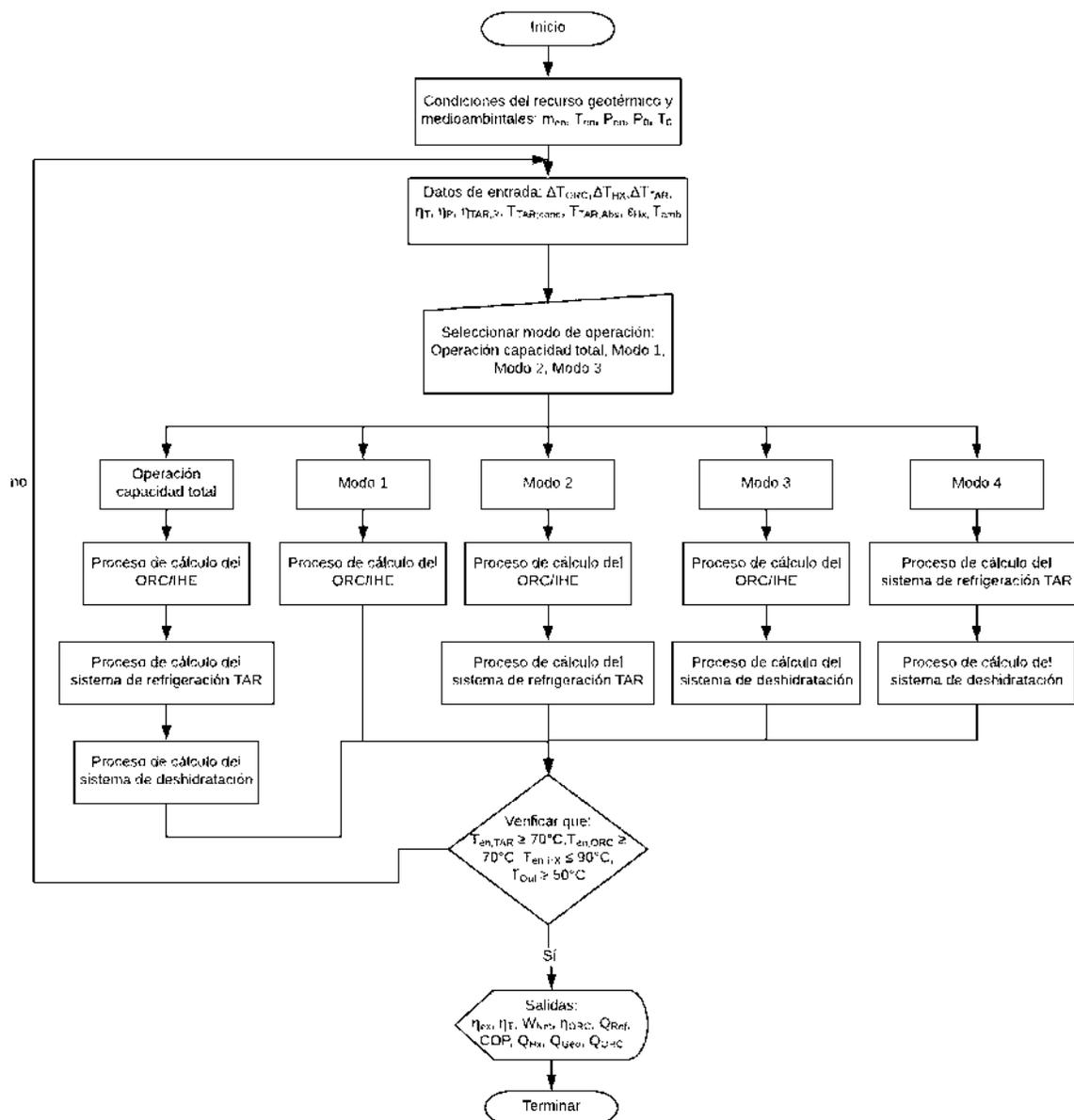


Figura 94. Diagrama de flujo del sistema para simulación.

Tabla 27. Relaciones de energía de la planta de poli-generación.

Equipo	Sistema ORC con IHE
Evaporador	$\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_1 C_p (T_1 - T_2)$ $\dot{Q}_{ORC} = \dot{m}_8 (h_5 - h_8)$
Turbina	$\eta_T = \frac{(h_5 - h_6)}{(h_5 - h_{6S})}$ $\dot{W}_T = \dot{m}_5 (h_5 - h_6)$

Generador eléctrico	$\dot{W}_e = \dot{W}_T * \eta_G$
Condensador	$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_{6'}(h_{6'} - h_7)$ $\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_9 C_p (T_{10} - T_9)$
Bomba	$\eta_P = \frac{(h_{7'S} - h_7)}{(h_{7'} - h_7)}$ $\dot{W}_P = \dot{m}_7(h_{7'} - h_7)$
IHE	$\dot{Q}_{IHE} = \dot{m}_6(h_6 - h_{6'})$ $\dot{Q}_{IHE} = \dot{m}_{7'}(h_8 - h_{7'})$
Sistema de refrigeración de simple efecto LiBr-H₂O	
Generador	$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_2 C_p (T_2 - T_3)$ $\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{13} h_{13}$
Condensador	$\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{21} C_p (T_{22} - T_{21})$ $\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{17}(h_{17} - h_{18})$
Evaporador	$\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{19}(h_{20} - h_{19})$ $\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_{23}(h_{23} - h_{24})$
Absorbedor	$\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{20} h_{20}$ $\quad - \dot{m}_{11} h_{11}$ $\dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{25}(h_{26} - h_{25})$
SHX	$\epsilon_{SHX} = \frac{(T_{13} - T_{12})}{(T_{14} - h_{12})}$
Bomba	$\eta_P = \frac{(h_{12S} - h_{11})}{(h_{12} - h_{11})}$ $\dot{W}_{P,TAR} = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11})$
Válvula 1	$h_{15} = h_{16}$
Válvula 2	$h_{18} = h_{19}$
HX	$\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_3 C_p (T_3 - T_4)$ $\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_{27}(h_{28} - h_{27})$

Tabla 28. Relaciones exergéticas para la planta de poli-generación.

Equipo	Relaciones de exergía
	con IHE
Evaporador	$\dot{B}_{D,Eva} = (\dot{B}_1 + \dot{B}_8) - (\dot{B}_2 + \dot{B}_5)$
Turbina	$\dot{B}_{D,T} = (\dot{B}_5 - \dot{B}_6) - \dot{W}_T$
Generador eléctrico	$\dot{B}_{D,G} = \dot{W}_T - \dot{W}_e$
Condensador	$\dot{B}_{D,Cond} = (\dot{B}_{6'} + \dot{B}_9) - (\dot{B}_7 + \dot{B}_{10})$
Bomba	$\dot{B}_{D,P} = (\dot{B}_7 - \dot{B}_{7'}) + \dot{W}_P$
IHE	$\dot{B}_{D,IHE} = (\dot{B}_6 + \dot{B}_{7'}) - (\dot{B}_{6'} + \dot{B}_8)$
Simple efecto LiBr-H₂O	
Generador	$\dot{B}_{D,Gen} = (\dot{B}_2 + \dot{B}_{13})$ $\quad - (\dot{B}_3 + \dot{B}_{14} + \dot{B}_{17})$
Condensador	$\dot{B}_{D,Conden} = (\dot{B}_{17} + \dot{B}_{21})$

	$-(\dot{B}_{18} + \dot{B}_{22})$
Evaporador	$\dot{B}_{D,Evap} = (\dot{B}_{19} + \dot{B}_{23})$ $-(\dot{B}_{20} + \dot{B}_{24})$
Absorbedor	$\dot{B}_{D,Abs} = (\dot{B}_{20} + \dot{B}_{16} + \dot{B}_{25})$ $-(\dot{B}_{11} + \dot{B}_{26})$

6.5 Parámetros de entrada y salida de la simulación

Los datos de entrada son todos los parámetros que el modelo requiere para iniciar el proceso de la simulación. Las características y condiciones de diseño para la planta de poligeneración mediante el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpía se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29. Condiciones requeridas en el diseño de la planta de poli-generación.

Parámetro	Valor
Capacidad nominal [kW]	327
Capacidad neta	Variable en cada caso
Presión de trabajo turbina del ORC [bar]	13.25
Presión absoluta de escape de la turbina [bar]	2.36
Temperatura mínima de activación TAR simple efecto [°C]	80
Tensión de generación [V/kV]	440/13,8
Frecuencia [Hz]	60
Factor de potencia	0,9
Tensión de transmisión [kV]	115
Presión atmosférica [bar]	1.013

Condiciones medioambientales para el diseño de la planta

Las condiciones de referencia que deben tomarse como base para la determinación de la garantía de operación son:

- a) Condiciones de diseño de verano para determinar el punto de diseño
 - Temperatura de bulbo húmedo de diseño 16°C
 - Humedad relativa media 56%
- b) Condiciones del sitio medias anuales para determinar el consumo térmico
 - Temperatura de bulbo húmedo 12°C
 - Humedad relativa media 56%
- c) Condiciones de temperatura mínima
 - Temperatura de bulbo seco -1°C
 - Humedad relativa media 56%
- d) Condiciones de tempera máxima
 - Temperatura de bulbo seco 30°C
 - Humedad relativa media 56%

Suposiciones

Para realizar el modelado termodinámico para la simulación de la planta de poligeneración en cascada, se establecieron el siguiente conjunto de supuestos:

- Todos los subsistemas operan en estado estable y a plena carga.
- No hay variación en las demandas de potencia, enfriamiento o térmica a lo largo del año.
- Los cambios en la energía cinética y potencial son despreciables.
- El fluido geotérmico se considera agua caliente en estado de líquido comprimido.
- El flujo másico del fluido geotérmico se supone a 20 kg/s.
- La temperatura del fluido geotérmico se considera 130 °C.
- Los valores de referencia de entalpía y entropía para los análisis exergéticos se determinan considerando una temperatura ambiente de 20 °C y una presión de 1 bar.
- Las pérdidas de calor a través de los componentes del sistema son insignificantes.
- Las turbinas y bombas se consideran con una eficiencia isotrópica de 80% y 75%, respectivamente [143].
- La eficiencia del generador eléctrico es del 96% [143].
- La eficiencia de la bomba de solución es del 60% [145].
- La temperatura de diseño en el condensador y el absorbedor es de 30 °C

Tabla 30. Datos de entrada de la simulación.

Subsistema ORC	
Variable	Descripción
\dot{m}_1	Flujo másico del fluido geotérmico [kg/s]
ΔT_{ORC}	Diferencia de temperatura de entrada/salida del ORC [°C]
$PPTD_{ev}$	Diferencia de temperatura pinch point del evaporador [°C]
$PPTD_{cond}$	Diferencia de temperatura pinch point del condensador [°C]
T_1	Temperatura de entrada del fluido geotérmico [°C]
P_e	Presión de entrada del fluido geotérmico [bar]
T_9	Temperatura de entrada de agua de enfriamiento [°C]
ΔT_c	Diferencia de temperatura de entrada/salida agua de enfriamiento [°C]
Subsistema de Absorción	
T_{23}	Temperatura de entrada de agua enfriada [°C]
T_{24}	Temperatura de salida de agua enfriada [°C]
ΔT_{TAR}	Diferencia de temperatura de entrada/salida de agua caliente del TAR [°C]
$\Delta T_{AE,TAR}$	Diferencia de temperatura de entrada/salida del agua de enf. del TAR [°C]
Subsistema de deshidratación	
ΔT_{HX}	Diferencia de temperatura de entrada/salida del HX

Tabla 31. Datos de salida de la simulación.

Subsistema ORC	
Variable	Descripción
Q_{ORC}	Calor que entra al ORC [kW]
$\eta_{ex,ORC}$	Eficiencia exergética del ORC [-]
$\eta_{T,ORC}$	Eficiencia térmica del ORC [-]
\dot{W}_T	Potencia de la turbina [kW]
\dot{W}_B	Potencia e bombeo [kW]
$\dot{m}_{AE,ORC}$	Flujo másico del agua de enfriamiento [kg/s]
Subsistema de Absorción	
\dot{m}_{AE}	Flujo másico del agua de enfriamiento [kg/s]
\dot{m}_{AC}	Flujo másico del agua de enfriamiento [kg/s]
COP_{TAR}	Coefficiente de rendimiento TAR[-]
\dot{Q}_{Ev}	Capacidad de enfriamiento [TR]
Subsistema de deshidratación	
\dot{Q}_{HX}	Calor aprovechado en el HX [kW]
\dot{m}_{PD}	Cantidad de producto deshidratado [kg/día]
Sistema global	
η_{ex}	Eficiencia exergética [-]
\dot{W}_{neta}	Potencia neta del sistema [kW]
η_T	Eficiencia térmica del sistema [-]

6.6 Simulación de la operación

Los ciclos considerados para aprovechar el recurso geotérmico de la planta de poli-generación son un ciclo Rankine Orgánico, un ciclo de absorción de simple efecto y un sistema de deshidratación de jitomate.

Para la simulación de la planta de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía es necesario conocer los parámetros que son influyentes en la operación de dicha planta. Como el ORC es el subsistema primario y el generador de potencia se debe de comenzar con este sistema para identificar estos parámetros. Muchas variables influyen la eficiencia del sistema en forma negativa. La eficiencia global del sistema ORC y la potencia neta de salida aumentan con un aumento en la entrada térmica (flujo másico y temperatura del recurso geotérmico). La evaporación del fluido de trabajo se ve afectada con la variación de la temperatura de la fuente de calor. La eficiencia isentrópica

de la turbina disminuye aproximadamente de 78% a 68% para una reducción del flujo másico del fluido de trabajo del 50%. Un aumento de la capacidad de enfriamiento y de la velocidad del fluido de trabajo aumenta tanto la potencia neta y la eficiencia térmica del ORC.

Dos parámetros de gran importancia para el funcionamiento son el flujo másico del fluido frío y su temperatura. Un aumento en la temperatura de entrada o una reducción en el flujo másico del fluido de enfriamiento resultan en una temperatura más alta de salida del fluido frío. Esto produce un aumento de la presión de condensación, disminución de la potencia de salida del expansor. Debido a estas tendencias, la temperatura de salida del disipador de calor y el aumento de la temperatura del disipador de calor debe mantenerse lo más bajo posible.

El sistema de enfriamiento por absorción también es evidente que está influenciado por la temperatura del recurso geotérmico, a mayor temperatura del recurso geotérmico la temperatura de salida del sistema ORC es más alta y por consiguiente aumenta el COP y se logran mejores temperaturas de enfriamiento. Al igual que el sistema ORC el sistema de absorción también se ve afectado de manera importante por la temperatura del fluido de enfriamiento, si esta aumenta el COP disminuye y la temperatura de refrigeración aumenta perjudicando el rendimiento del sistema, pero si esta disminuye el COP aumenta y la temperatura de refrigeración disminuye logrando así un mejor rendimiento del sistema. Cabe mencionar que esta temperatura de enfriamiento está directamente influenciada por la temperatura ambiente ya que el sistema global utiliza una torre de enfriamiento húmeda.

Para el sistema de deshidratación la variación en la temperatura del recurso geotérmico es de gran importancia ya que de eso depende la velocidad con que se lleve a cabo el proceso de deshidratación. La temperatura ambiente también influye de manera similar, ya que de acuerdo a las condiciones ambientales el proceso se puede acelerar o retardar dependiendo si la temperatura ambiente aumenta o disminuye.

6.6.1 Parámetros influyentes

Variación de la temperatura del flujo geotérmico. La variación de la temperatura del flujo geotérmico impacta de manera relevante el funcionamiento de la planta, esta variación impacta directamente en la potencia eléctrica generada, la eficiencia térmica del sistema ORC, en el COP del sistema de refrigeración por absorción y en la cantidad de toneladas de refrigeración, para el sistema de deshidratación impacta en la eficiencia térmica del sistema y en la cantidad de producto deshidratado. La variación de temperatura del flujo geotérmico considerado 110-140 °C, esto debido a la restricción que se puede tener en la activación del sistema de absorción, en caso de tener temperaturas por debajo de 100°C el sistema no funcionaría en su totalidad, estaría fuera de funcionamiento sistemas tales como el de absorción y el sistema de deshidratación. La Figura 93 muestra el diagrama para la simulación de la planta cuando hay variación en la temperatura del recurso geotérmico.

Variación de la temperatura ambiente. Una variable importante para la capacidad de **la planta** es la temperatura ambiente. La variación de la temperatura ambiente impacta de manera relevante el funcionamiento de la planta, esta variación impacta directamente en la potencia eléctrica neta, la eficiencia térmica del sistema ORC, en el COP del sistema de refrigeración por absorción y en la cantidad de frío producido, para el sistema de deshidratación impacta en la eficiencia térmica del sistema y en la cantidad de producto deshidratado. La variación de temperatura ambiente considerado es -1 a 30 °C, esto es considerando la temperatura mínima y máxima extrema del sitio seleccionado

para la planta (Ver Figura 96). La Figura 95 muestra el diagrama para la simulación de la planta cuando hay variación en la temperatura ambiente.

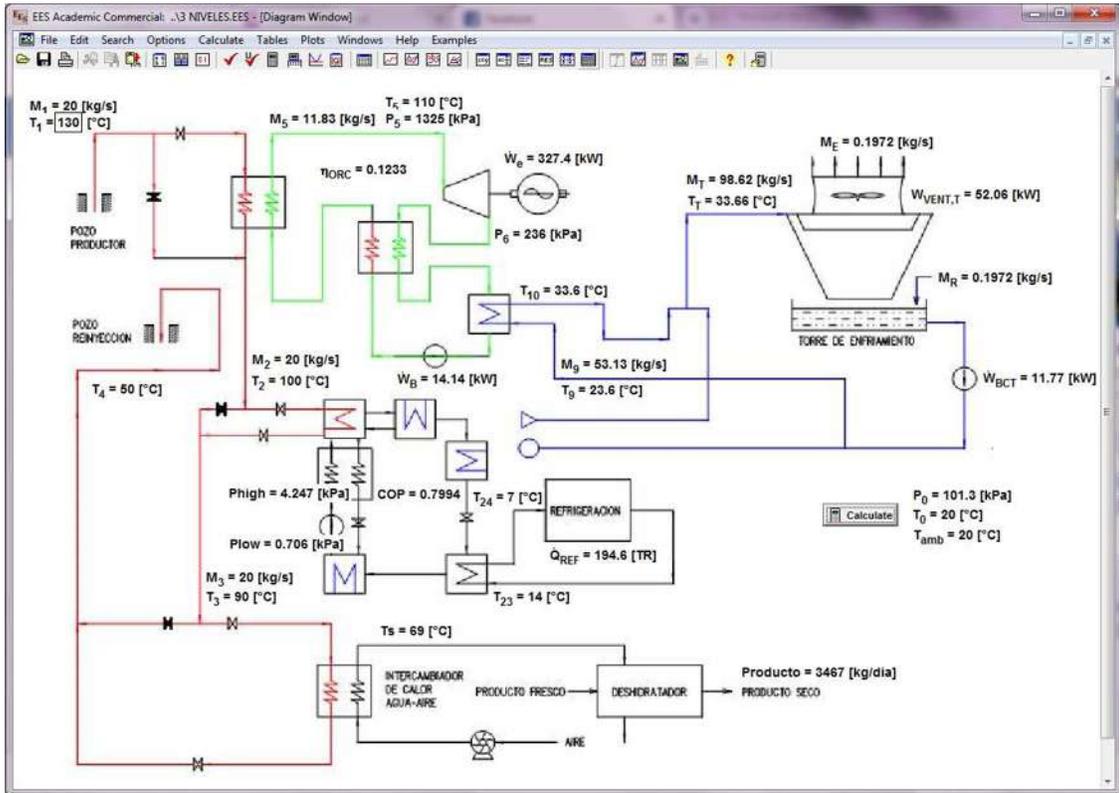


Figura 95. Diagrama del programa de simulación temperatura recurso geotérmico.

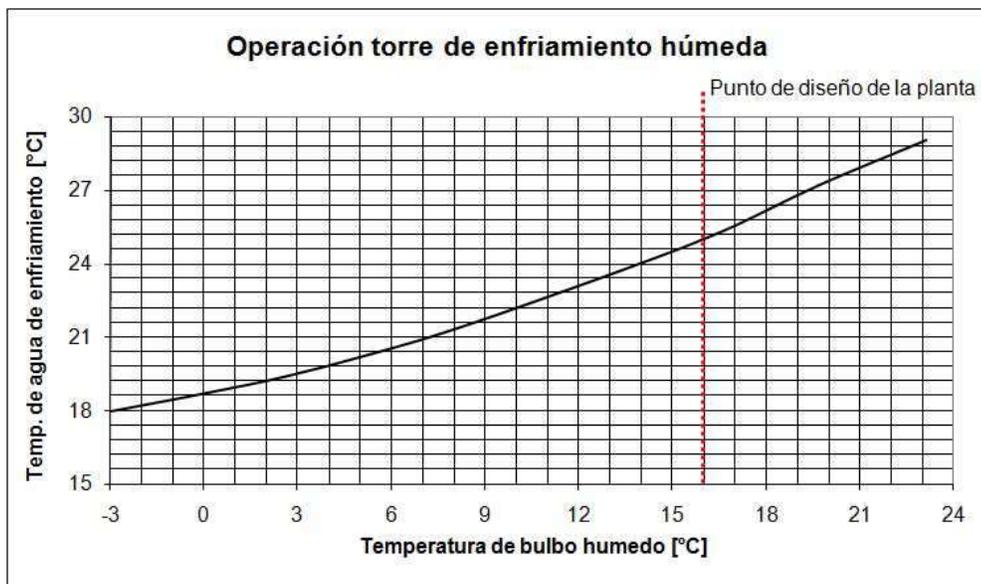


Figura 96. Operación de la torre de enfriamiento de la planta.

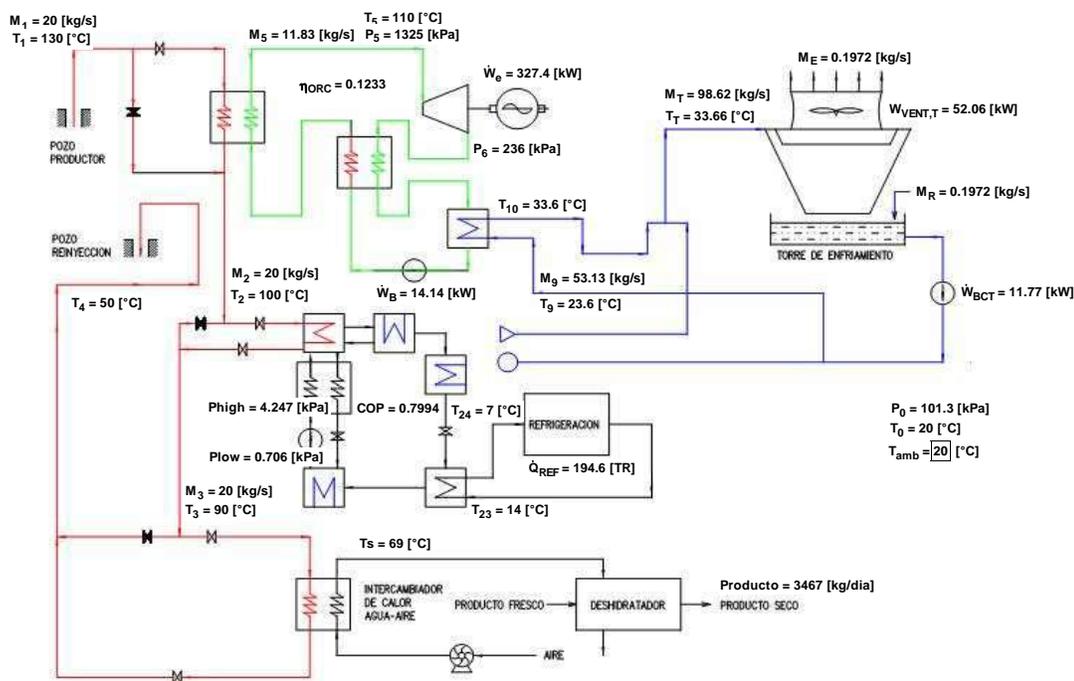


Figura 97. Diagrama del programa de simulación temperatura ambiente.

6.6.2 Validación del modelo

No es sencillo validar la planta de poli-generación en cascada, porque, al tratarse de un sistema conceptual a desarrollarse no existen plantas similares en operación. Sin embargo, se puede llevar a cabo una estimación de los resultados de la planta en condiciones estáticas, asumiendo parámetros estándar de los subsistemas ORC y TAR de la información de los fabricantes para sistemas modulares existentes comercialmente, se analizan y comparan e manera separada cada uno de los subsistemas, para el subsistema ORC se considera un sistema ORC para agua caliente de alta y baja temperatura del fabricante HANPOWER ENERGY TECHNOLOGY®, para el subsistema TAR se considera un sistema de absorción de simple efecto de LiBr/H₂O del fabricante VOLTAS LIMITED EM&R Business Group®, de la parte del subsistema de deshidratación, el modelos de deshidratación se desarrollo en base a los parámetros experimentales obtenidos en la planta de secado de jitomate de Nea Kessani, Xanthi, Grecia [209].

Primeramente introducimos la información de los módulos comerciales al modelo de simulación, para posteriormente comparar los resultados numéricos relativos al rendimiento, flujos y a la potencia eléctrica y de enfriamiento particulares de la tecnología disponible, para el subsistema ORC se consideran dos escenarios de comparación, uno es el modulo ORC para agua caliente de alta temperatura de 300 kW netos y el otro es el modulo ORC para agua caliente de baja temperatura también de 300 kW netos, en el caso del subsistema TAR también consideramos dos escenarios de comparación, para ambos escenarios se utilizan los datos del modelo de absorción de LiBr/H₂O de simple efecto para agua caliente de alta y baja temperatura HAU - H/L - N.

Esta comparación permitirá definir la fiabilidad del modelo para predecir y estudiar la operación de la panta de poli-generación en cascada. En las Tablas 32 y 33 se muestran las comparaciones entre los

resultados obtenidos al analizar varios parámetros que son determinantes en la operación de los subsistemas y las condiciones de operación estándar.

Tabla 32. Comparativo del modelo de simulación ORC con el modelo de agua caliente de alta y baja temperatura HANPOWER ORC.

Usando agua caliente de alta temperatura				
Parámetro	Unidad	Módulo ORC	Modelo	Diferencia
Potencia neta	kW	300	310	+ 3.33 %
Flujo de agua caliente	T/h	60	60	0
Flujo de agua de enfriamiento	T/h	358	357.84	- 0.04 %
Temperatura de entrada del agua caliente	°C	140	140	0
Temperatura de salida del agua caliente	°C	100	100	0
Temperatura de entrada del agua de enfriamiento	°C	25	25	0
Temperatura de salida del agua de enfriamiento	°C	31	31	0
Usando agua caliente de baja temperatura				
Parámetro	Unidad	Módulo ORC	Modelo	Diferencia
Potencia neta	kW	300	304.7	+ 1.57 %
Flujo de agua caliente	T/h	134	134	0
Flujo de agua de enfriamiento	T/h	750	783	+ 4.40 %
Temperatura de entrada del agua caliente	°C	95	95	0
Temperatura de salida del agua caliente	°C	58	58	0
Temperatura de entrada del agua de enfriamiento	°C	25	25	0
Temperatura de salida del agua de enfriamiento	°C	31	31	0

Tabla 33. Comparativo del modelo de simulación TAR con el modelo de absorción de LiBr/H₂O de simple efecto para agua caliente de alta y baja temperatura: HAU - H/L - N.

HAU_H 1 etapa agua caliente de alta temperatura				
Parámetro	Unidad	Módulo TAR	Modelo	Diferencia
Capacidad de enfriamiento	TR	200	213.7	7.85%
Flujo de agua caliente	T/h	36	36	0
Temperatura de entrada del agua caliente	°C	140	140	0
Temperatura de salida del agua caliente	°C	115	115	0
Flujo de agua de enfriamiento	T/h	146.08	174.67	19.56%
Temperatura de entrada del agua de enfriamiento	°C	32	32	0
Temperatura de salida del agua de enfriamiento	°C	37	37	0
Flujo de agua enfriada	T/h	120.96	129.17	6.78%
Temperatura de entrada del agua enfriada	°C	12	12	0
Temperatura de salida del agua enfriada	°C	7	7	0
HAU_L 1 etapa agua caliente de baja temperatura				
Parámetro	Unidad	Módulo TAR	Modelo	Diferencia
Capacidad de enfriamiento	TR	100	100.7	0.70%

Flujo de agua caliente	T/h	89	36	0
Temperatura de entrada del agua caliente	°C	85	85	0
Temperatura de salida del agua caliente	°C	80	80	0
Flujo de agua de enfriamiento	T/h	190.15	151.6	20.27%
Temperatura de entrada del agua de enfriamiento	°C	31	31	0
Temperatura de salida del agua de enfriamiento	°C	36	36	0
Flujo de agua enfriada	T/h	60.98	60.88	0.16%
Temperatura de entrada del agua enfriada	°C	14	14	0
Temperatura de salida del agua enfriada	°C	9	9	0

En las tablas se aprecia que los números son perfectamente razonables y las diferencias que se aprecian no son excesivas, las diferencias en flujos, potencia y enfriamiento también se debe a los factores de protección de las garantías de generación del fabricante, lo que confirma que el modelo puede ser utilizado para la simulación. Al obtener una similitud satisfactoria entre los datos de los módulos de los fabricantes y el modelo, se puede concluir que la simulación sirve para introducirla en el modo estático, y realizar los ensayos necesarios para analizar cómo se comportará el sistema ante los cambios introducidos.

6.6.3 Modos de operación

Operación con un nivel de cascada - generación eléctrica. En este esquema de operación de la planta, el subsistema ORC opera bajo las condiciones a plena carga de diseño con la variación de que los sistemas de refrigeración y de deshidratación se encuentran fuera de operación. Este modo de operación puede utilizarse todo el tiempo, pero se recomienda solo utilizarla cuando los subsistemas de refrigeración y de deshidratación requieran mantenimiento, de otra forma si se utiliza más tiempo de lo necesario se estaría desaprovechando las bondades que nos proporciona el sistema y por consiguiente energía aprovechable desperdiciada indiscriminadamente.

Operación con dos niveles – generación eléctrica y refrigeración. En este esquema de operación de la planta, el subsistema ORC opera bajo las condiciones a plena carga de diseño con la variación de que el sistema de deshidratación se encuentra fuera de operación.

Operación con dos niveles – generación eléctrica y deshidratación. En este esquema de operación de la planta, el subsistema ORC opera bajo las condiciones a plena carga de diseño con la variación de que el sistema de refrigeración se encuentra fuera de operación.

Operación con dos niveles – refrigeración y deshidratación. En este esquema de operación de la planta, el sistema opera bajo las condiciones a carga limitada de diseño y con la variación de que el sistema ORC se encuentra fuera de operación, implicando tener otro suministro de alimentación eléctrica.

Para facilitar la comprensión de los modos de operación de la planta se ha definido la siguiente nomenclatura:

- Modo 1. Operación con un nivel: generación de electricidad
- Modo 2. Operación con dos niveles: generación de electricidad + refrigeración..
- Modo 3. Operación con dos niveles: generación de electricidad + deshidratación.

- Modo 4. Operación con dos niveles: producción de hielo + deshidratación.

6.7 Análisis y resultados

6.7.1 Resultados de la simulación de la planta

La simulación es el núcleo de este capítulo porque se pretende modelar el proceso para tratar de asemejar al proceso real. Cualquier irregularidad o falta de coincidencia en él se reflejará en toda la metodología y hay una gran posibilidad de llegar a conclusiones erróneas. Por lo tanto la validación del modelo es el paso importante con el fin de identificar la precisión del modelo. Se puede estimar el grado de similitud que presentan ambos sistemas, el de los módulos comerciales con el simulado, comparando los datos de la planta integrada por los módulos comerciales con los resultados obtenidos a partir del modelo de simulación y realizar ensayos en el modelo dinámico introduciendo escalones en algunas entradas del modelo para averiguar si el control implementado es óptimo.

Variación de la temperatura del flujo geotérmico

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 98, se puede notar que a una disminución de la temperatura del flujo geotérmico la potencia neta de la planta decae rápidamente, no es el caso de la eficiencia del ORC, la eficiencia del sistema se mantiene más estable debido a que dicha disminución no impacta en el rendimiento de la turbina de igual manera que lo hace en el consumo de los sistemas propios de la planta y que también a más bajas temperaturas en sistema de absorción opera de manera deficiente, razón principal de la disminución de la potencia neta.

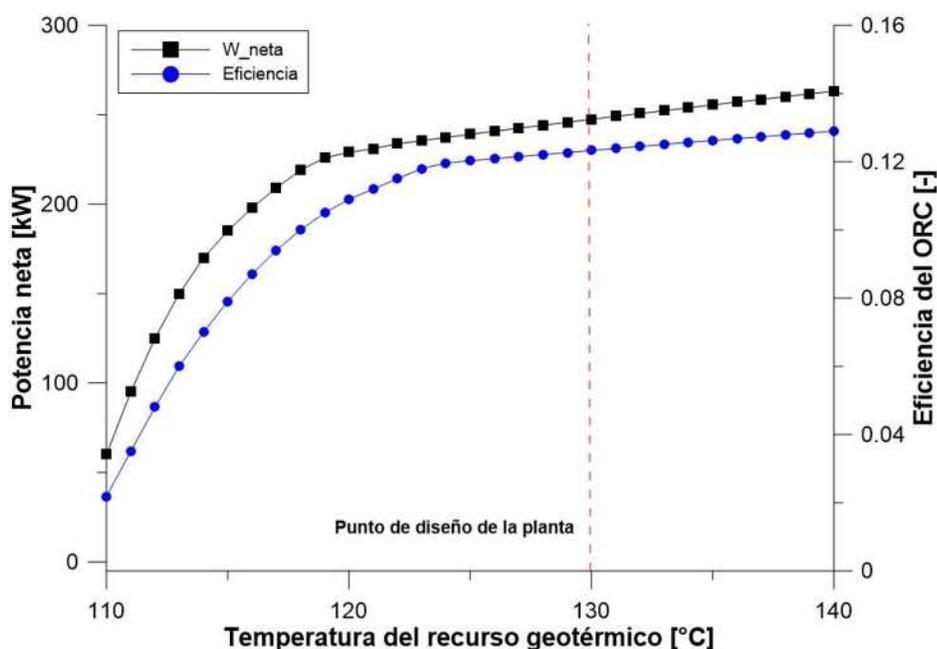


Figura 98. Comportamiento del ORC con variación de la temperatura del flujo geotérmico.

La variación de la temperatura del flujo geotérmico también afecta de manera directa el funcionamiento del sistema de absorción. De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 99, se puede notar que a una disminución de la temperatura del flujo geotérmico la capacidad de enfriamiento disminuye

considerablemente, para el caso del coeficiente de operación COP inicialmente tiene un decremento suave hasta aproximadamente 120°C para después disminuir drásticamente.

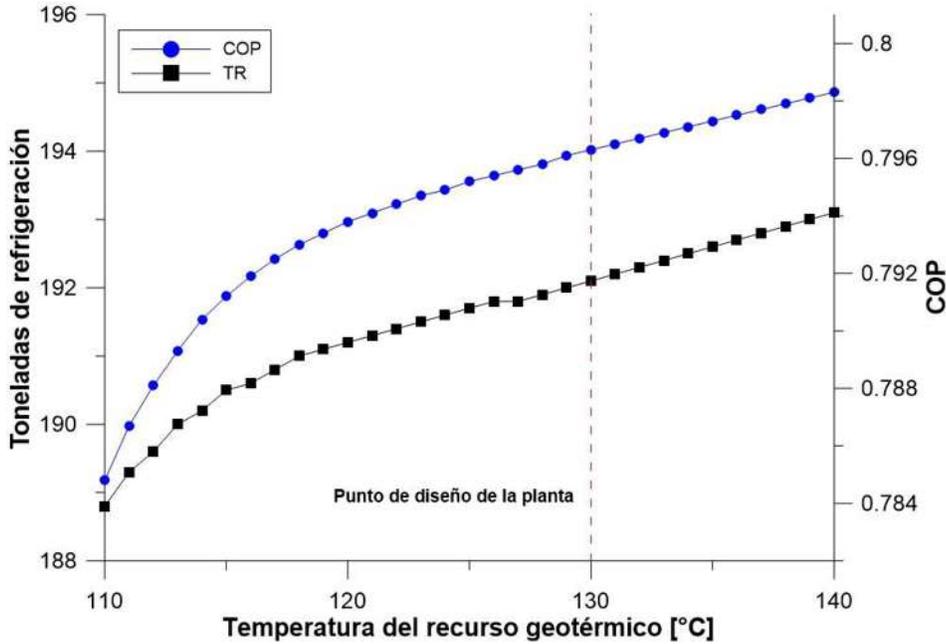


Figura 99. Comportamiento de la máquina de absorción para diferente temperatura del flujo geotérmico

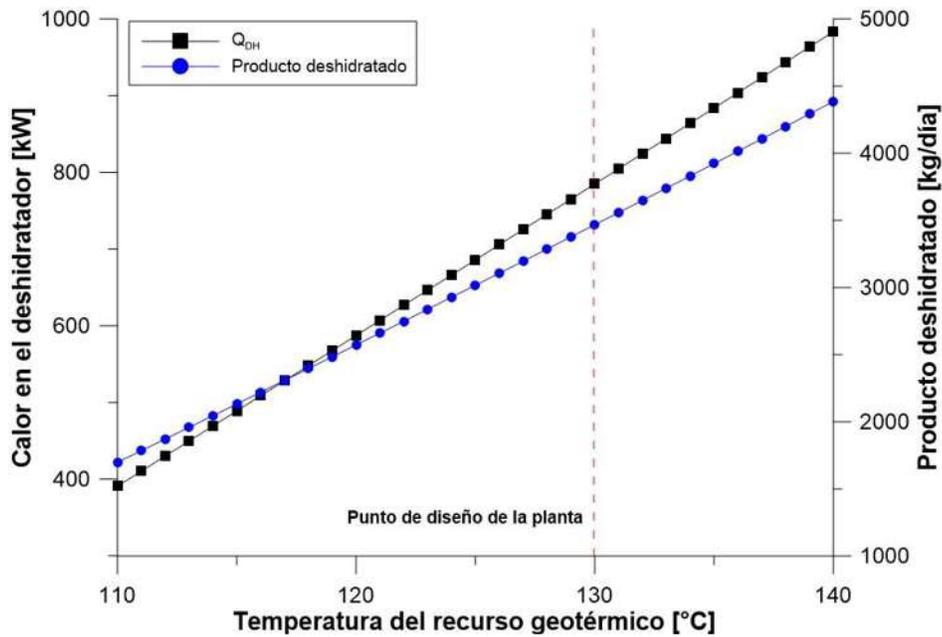


Figura 100. Comportamiento del sistema de deshidratación para diferente temperatura del flujo geotérmico.

De igual manera, la variación de la temperatura del flujo geotérmico también afecta de manera directa el funcionamiento del sistema de deshidratación. De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 100,

se puede observar que a una disminución de la temperatura del flujo geotérmico, la capacidad de deshidratación disminuye rápidamente, lo cual impactará en la cantidad de producto a procesar.

6.7.2 Variación de la temperatura ambiente

La variación de la temperatura ambiente es una de las consideraciones más importantes dentro del funcionamiento de la planta, esto es porque la variación ocurre a cada momento y es necesario tener en cuenta como impacta en la operación de la planta. De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 101, se puede notar que a una disminución de la temperatura ambiente se tiene un incremento en la eficiencia del ORC y en la potencia neta de la planta. Esto es debido a que la temperatura ambiente influye directamente a la temperatura del agua de enfriamiento, que consecuentemente, genera una menor presión de operación del condensador lo que favorece el proceso de expansión en la turbina. Esto se traduce en un aumento en la potencia generada, además de que el sistema de absorción tiene un mejor rendimiento.

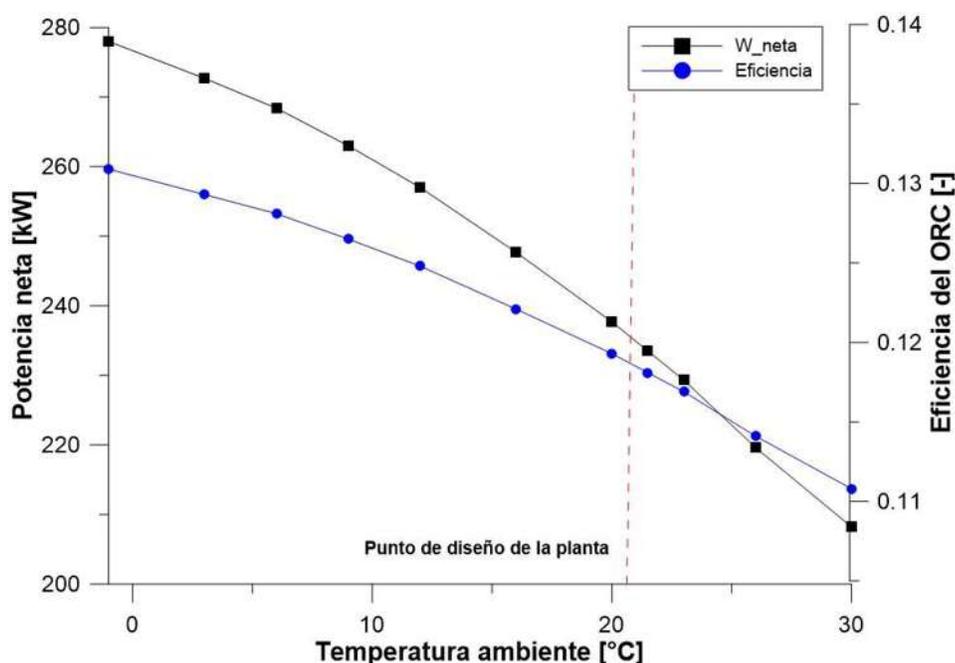


Figura 101. Comportamiento del ORC con variación de la temperatura ambiente.

La variación de la temperatura ambiente también afecta de manera directa el funcionamiento del sistema de absorción. De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 102, se puede notar que a una disminución de la temperatura ambiente la capacidad de enfriamiento, así como el coeficiente de operación COP aumentan; y de manera inversa, si la temperatura ambiente aumenta estos dos parámetros disminuyen.

La variación de la temperatura ambiente también afecta de manera directa el funcionamiento del sistema de deshidratación. De acuerdo con la Figura 103, se puede notar que a una disminución de la temperatura ambiente la capacidad del sistema de deshidratación disminuye y de manera inversa, si la temperatura ambiente aumenta este parámetro aumenta.

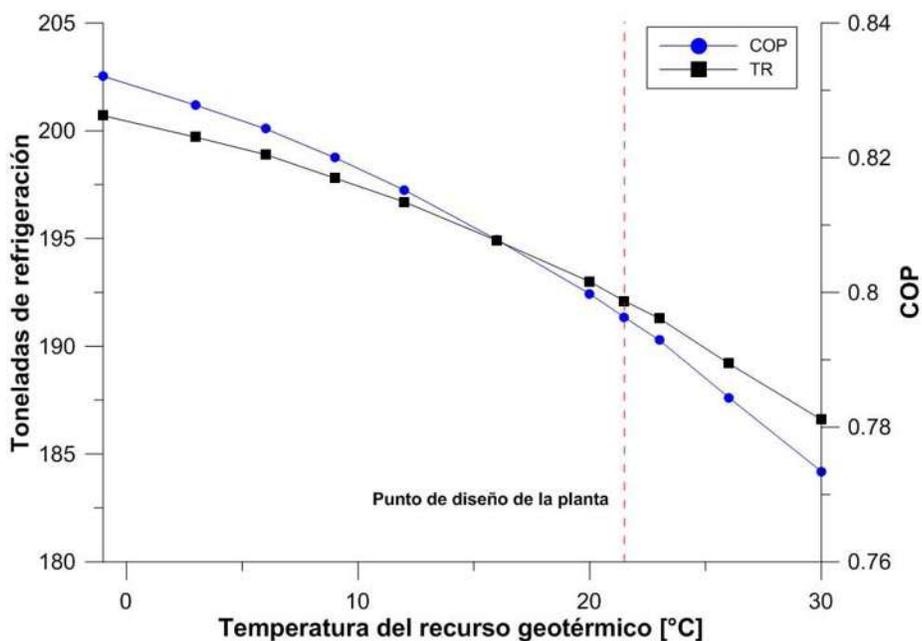


Figura 102. Comportamiento del enfriamiento con variación de la temperatura ambiente.

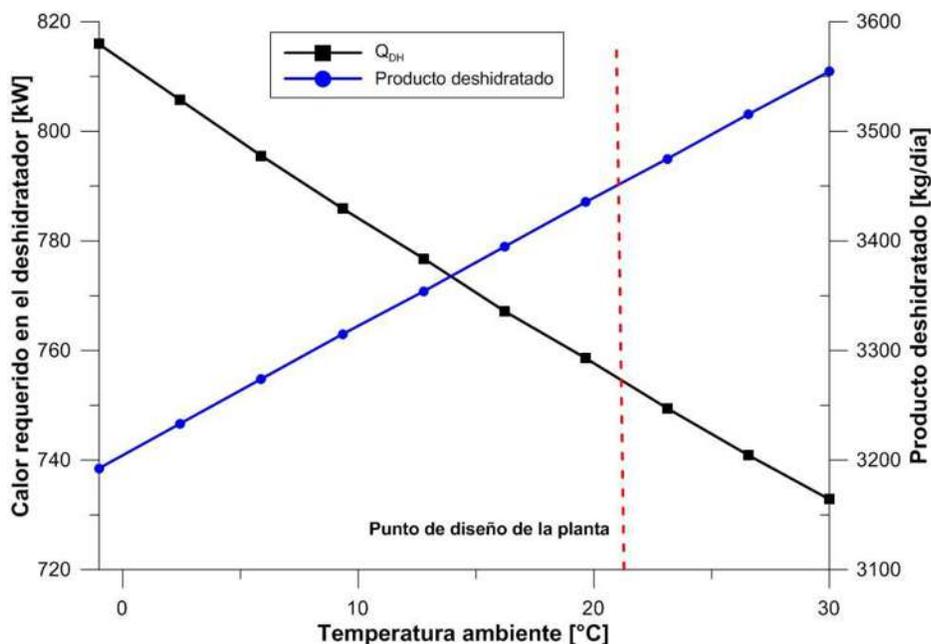


Figura 103. Comportamiento del sistema de deshidratación con la temperatura ambiente.

6.7.3 Operación con un nivel de la cascada – producción eléctrica

De acuerdo con estos resultados, utilizando solo un nivel de la cascada, para producir electricidad notamos que las cargas parasitas disminuyen solo un poco, debido a que los sistemas de absorción y de deshidratación tiene cargas parasitas pequeñas con respecto a las del sistema ORC.

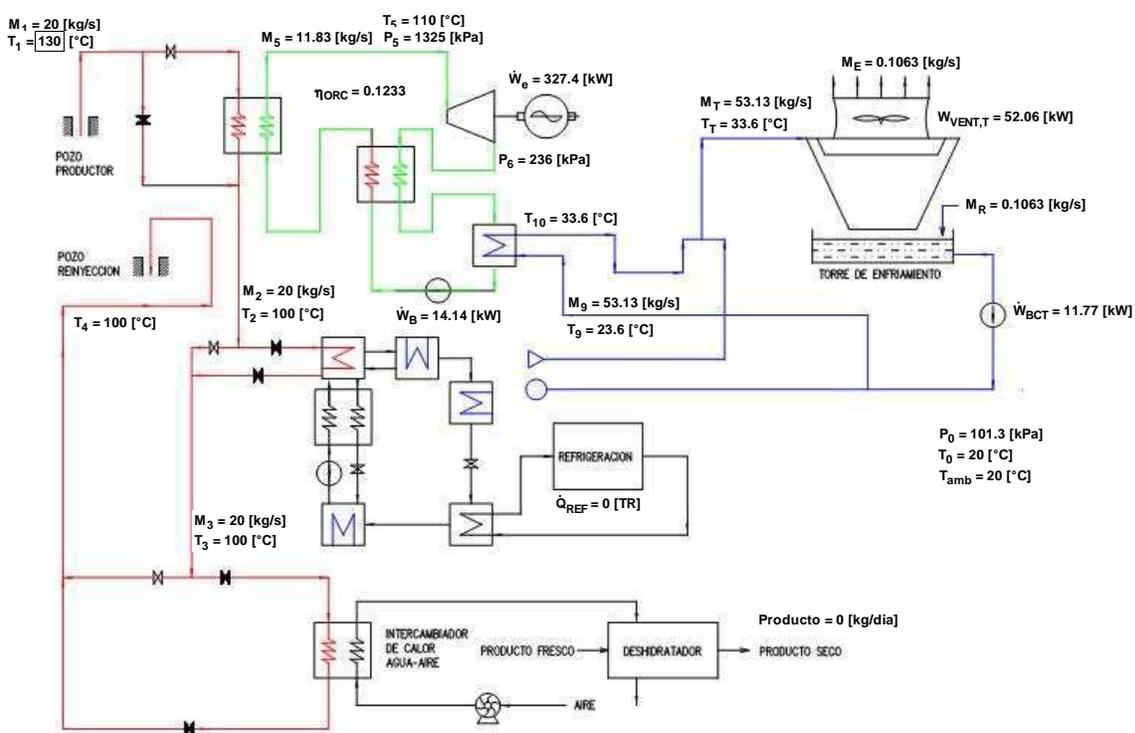


Figura 104. Diagrama de la planta en modo 1.

Tabla 34. Cargas parásitas de la planta en modo 1.

Parámetro	Valor	Unidad
W_B (ORC)	14.14	kW
W_B (TAR)	0	kW
W_B (Torre de enfriamiento)	11.77	kW
W_{Vent} (Sistema de deshidratación)	0	kW
W_{Vent} (Torre de enfriamiento)	52.06	kW
Total	77.97	kW

Tabla 35. Parámetros de funcionamiento de la planta en modo 1.

Parámetro	Valor	Unidad
W_{NETA}	249.5	kW
W_T (ORC)	334.1	kW
COP (TAT)	-	
η_{ORC}	12.33	%
η_{GLOBAL}	11.87	%

De acuerdo a estos resultados es de notarse que la eficiencia térmica global se disminuye considerablemente, esto debido a la disminución de calor aprovechado por la planta, en este caso solo el requerido por el sistema ORC.

6.7.4 Operación con dos niveles –producción de electricidad y refrigeración

De acuerdo a los resultados para este modo de operación, utilizando solo dos niveles de la cascada, el primero para producir electricidad y el segundo para refrigeración se nota que las cargas parasitas son casi las mismas que cuando opera completa la planta. De acuerdo a estos resultados la simulación indica que la eficiencia térmica global mejora considerablemente con respecto a la producción de electricidad solamente, esto debido al aprovechamiento de calor para generar el frío.

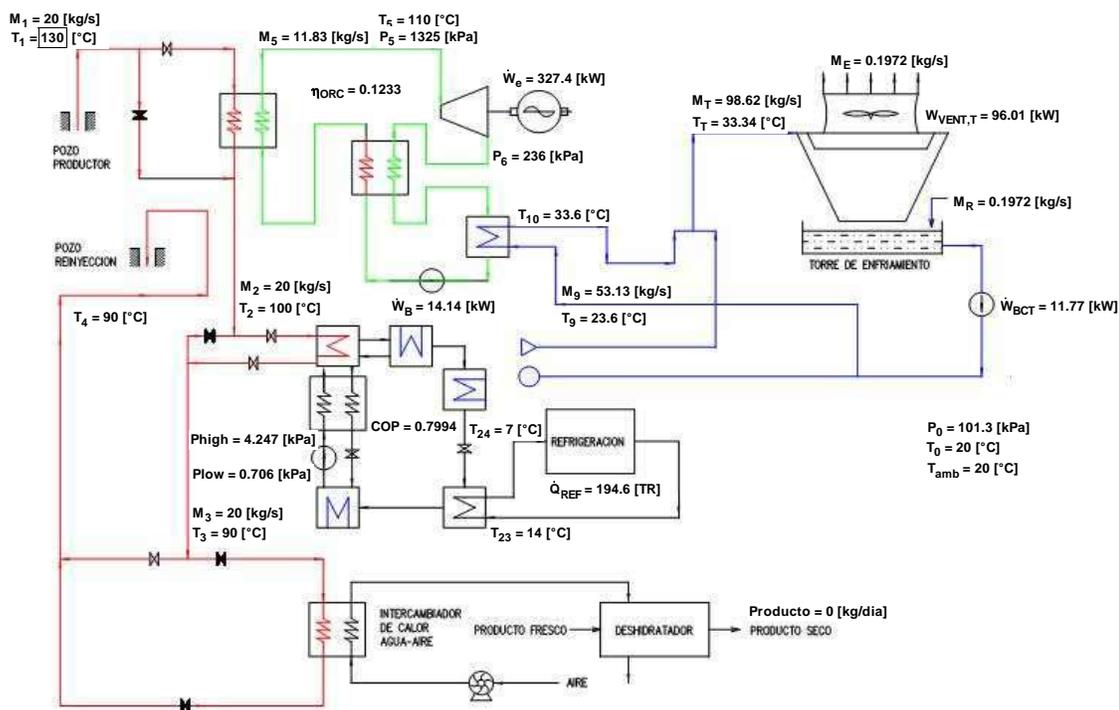


Figura 105. Diagrama de la planta en modo 2.

Tabla 36. Cargas parásitas de la planta en modo 2.

Parámetro	Valor	Unidad
W_B (ORC)	14.14	kW
W_B (TAR)	6.06	kW
W_B (Torre de enfriamiento)	21.86	kW
W_{Vent} (Sistema de deshidratación)	0	kW
W_{Vent} (Torre de enfriamiento)	28.08	kW
Total	70.14	kW

Tabla 37. Parámetros de funcionamiento de la planta en modo 2.

Parámetro	Valor	Unidad
W_{NETA}	267,4	KW
W_T (ORC)	334.1	kW
COP (TAR)	0.7994	-
η_{ORC}	12.33	%
η_{GLOBAL}	28.15	%

6.7.5 Operación con dos niveles – producción de electricidad y deshidratación

Utilizando solo dos niveles de la cascada, el primero para producir electricidad y el tercero para deshidratar jitomate, se puede notar que las cargas parasitas disminuyen, esto es debido a que el sistema de absorción no opera y este sistema aporta en gran medida las cargas parasitas del sistema en general.

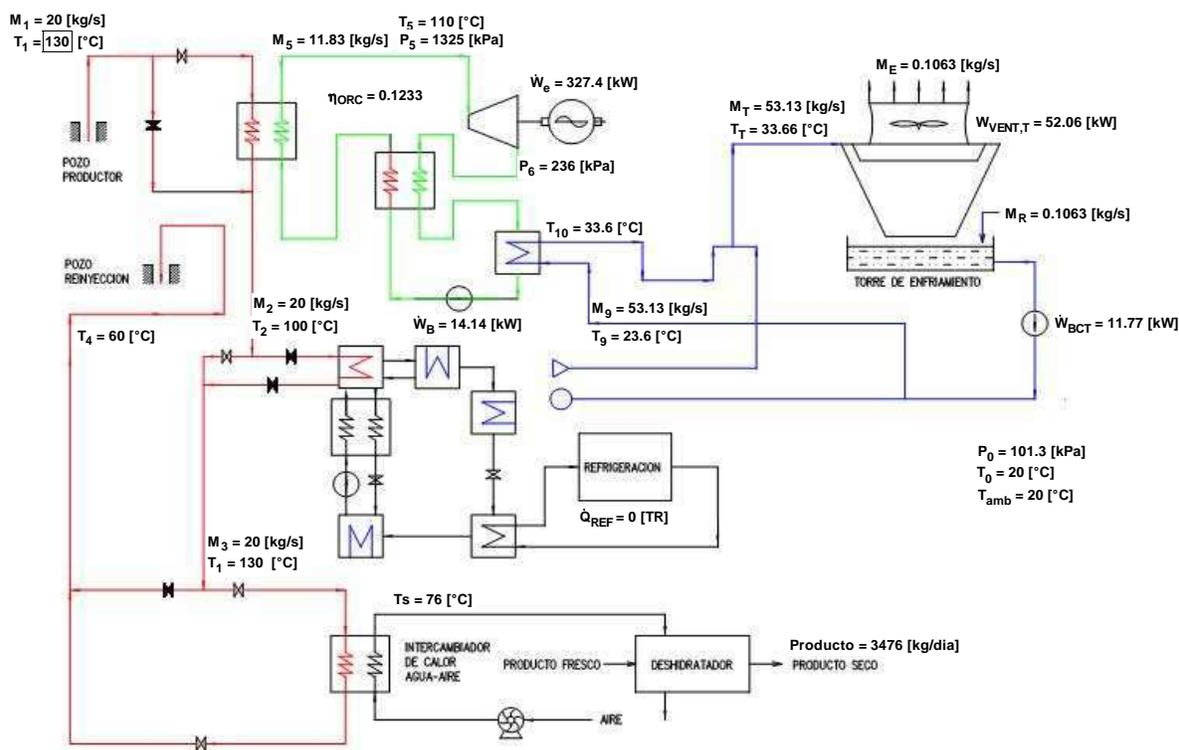


Figura 106. Diagrama de la planta en modo 3.

Tabla 38. Cargas parásitas de la planta en modo 3.

Parámetro	Valor	Unidad
W_B (ORC)	14,14	kW
W_B (Torre de enfriamiento)	11.77	kW
W_{Vent} (Sistema de deshidratación)	30	kW
W_{Vent} (Torre de enfriamiento)	52.06	kW
Total	107.97	kW

Tabla 39. Parámetros de funcionamiento de la planta en modo 3.

Parámetro	Valor	Unidad
W_{NETA}	271.5	kW
W_T (ORC)	334.1	kW
η_{ORC}	12.33	%
η_{GLOBAL}	17.93	%

De acuerdo a estos resultados es de notarse que la eficiencia térmica global es un poco mejor a la eficiencia del sistema ORC, esto debido que el aprovechamiento de calor para deshidratar está limitado por las temperaturas para evitar bacterias y que el producto perezca.

6.7.6 Operación con dos niveles – refrigeración y deshidratación

En el caso de utilizar dos niveles de la cascada, el segundo para refrigeración y el tercero para deshidratar jitomate, puede apreciarse que las cargas parasitas disminuyen de manera considerable, pero se tiene el inconveniente que la planta no genera electricidad lo que limita a tener que hacer uso de electricidad de otra fuente para garantizar el funcionamiento de la planta bajo esta condición. Además de que no se recomienda utilizar este modo ya que las temperaturas de operación de los subsistemas involucrados son altas, principalmente para el deshidratador lo que propiciaría que el producto pereciera y tener una pérdida del ingreso posible de la venta del producto.

6.7.7 Tablas con resumen de resultados

En esta sección se presentan de manera comparativa los resultados para la planta, para cada posible modo de operación. Para facilitar la comparación entre la planta y el modo de operación se ha definido la siguiente nomenclatura:

- Modo 1. Operación con un nivel: generación de electricidad
- Modo 2. Operación con dos niveles: generación de electricidad + refrigeración.
- Modo 3. Operación con dos niveles: generación de electricidad + deshidratación

Tabla 40. Comparativo de cargas parásitas de la planta.

Carga	Modo 1 [kW]	Modo 2 [kW]	Modo 3 [kW]
ORC			
Bomba	14.40	14.40	14.40
Bomba de agua de enfriamiento	11.77	21.86	11.77
Ventiladores de la torre de enfriamiento	52.06	28.08	52.06
Absorción			
Bomba	0	6.06	0
Deshidratador			
Ventilador	0	0	30
Total	77.97	70.14	107.97

Tabla 41. Comparativo de parámetros de la planta.

Carga	Modo 1 [kW]	Modo 2 [kW]	Modo 3 [kW]
ORC			
W_Turbina	334.1 kW	334.1 kW	334.1 kW
η_{ORC}	12.33 %	12.33 %	12.33 %
Absorción			
COP	-	0.7994	-

W_Neta	249.5 kW	267.4 kW	219.4 kW
η _Global	11.87 %	28.15 %	17.98 %

6.8 Conclusiones

El objetivo de llevar a cabo una simulación es el de tener un panorama amplio de cómo se comportará un sistema energético, en este caso en particular la planta de poligeneración con uso en cascada de la energía geotérmica. Este comportamiento tiene que determinarse en lo que es conocido como condiciones en punto de diseño y en condiciones fuera de diseño.

A partir de las simulaciones realizadas en este capítulo se puede concluir que la planta que está integrada por los sistemas de absorción de simple efecto son las que mejor rendimiento ofrecen para aplicaciones de refrigeración de productos agrícolas y por consiguiente los mejores beneficios. También se pueden mencionar que se recomiendan las plantas que contienen los sistemas ORC y absorción con mayor capacidad nominal ya que tienen mejores rendimientos y pueden absorber de mejor forma los impactos de los cambios en la operación.

Respecto a la variación de la temperatura del flujo geotérmico, la simulación indica que es el parámetro que mayor impacto tiene en la operación de la planta y de sus principales componentes. Por esta razón es necesario buscar alternativas para mitigar el impacto de esta variación y que las plantas operen siempre en las mejores condiciones, lo que se puede alcanzar incluyendo un sistema de aporte de calor suplementario. Por otro lado, el funcionamiento ante el cambio de la temperatura del flujo geotérmico es similar al del cambio por flujo, pero impacta mayormente en la capacidad de generación de cada subsistema.

La variación en la temperatura ambiente es considerable, el sistema global tiene la capacidad de absorber de una manera más eficiente los impactos generados por esta situación, aunque se debe de tener en consideración y no omitir ninguna acción que pueda beneficiar al sistema. Es deseable ubicar el sistema donde la mayor parte del año predominen temperaturas bajas, ya que garantiza una mejor operación de los componentes individuales del sistema.

En lo que respecta a la operación de la planta de forma parcial, esto es, con sistemas fuera de operación, no es recomendable puesto que la eficiencia de la planta disminuye de manera considerable y también los productos obtenidos. Solamente cuando la planta opera con el sistema de deshidratación fuera de operación se comportan de manera similar a que si operan a plena carga y con todos los sistemas en operación, esto es debido que el sistema de deshidratación consume muy poca de la energía que dispone el sistema, pero en consecuencia el sistema sufre una disminución considerable en la eficiencia debido al desperdicio de la energía que desaprovechamos en el subsistema deshidratador.

Referencias

- [1] IEA. World Energy Outlook 2014. Paris, Francia. 2014.
- [2] IPCC. Climate change 2007-the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press. Disponible en: www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm
- [3] Perley, C. The status and prospects for forestry as a source of bioenergy in Asia and the Pacific, Bangkok, Tailandia. Oficina Regional de la FAO para Asia y el Pacifico, 2008.
- [4] Íslandsbanki. U.S. geothermal industry overview. Reykjavik, Íslandsbanki Geothermal Research. 2011.
- [5] FAO. Energy-smart food for people and climate. Issue Paper. Rome 2011.
- [6] Congreso de la unión, Decreto reforma energética, Diciembre 2013, Mexico, D.F., Mexico, p 1-29.
- [7] SEMARNAT, Informe 2008, Compendio de estadísticas ambientales [Online], 2008. Disponible: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/00_intros/index.html
- [8] Gudmundsson, J. S., Direct uses of geothermal energy in 1984. GRC Bulletin 14 1985, p. 3–13.
- [9] Friðleifsson, G. Ó., Elders, W. A., Albertsson, A. The concept of the Iceland deep drilling project. Geothermics 2014, vol. 49, pp.2–8.
- [10] Sigfússon, B., Uihlein, A: 2014 JRC Geothermal Energy Status Report. JRC Science and Policy Reports. European Commission, 2015.
- [11] Bertani, R.: Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. Geothermics 2012, vol 41, pp.1–29.
- [12] Trillo, G. L., Angulo, V. R. Guía de la Energía Geotérmica, Madrid, España, 2012.
- [13] Popovski, K., Vasilevska, S. P. Heating greenhouses with geothermal energy. In Proceedings of the International Geothermal Workshop, 6–10 October 2003, Sochi, Russian Federation. Paper No. W00037, pp 17.
- [14] Alonso, H. Potencial Geotérmico de la República Mexicana, Second United Nations Symp. on the Development and use of Geothermal Resources 1975, Vol. 1, pp. 17-24
- [15] Mercado, S. The Geothermal Potential Evaluation of Mexico by Geothermal Chemistry, International Congress on Thermal Waters, geothermal Energy and Volcanisms of the Mediterranean Area, Atenas, Gr. 1976.
- [16] Alonso, H. Present and Planned utilization of Geothermal Resources in Mexico, Geothermal Resources Council Transactions 1985, pp. 135-140.
- [17] Mercado, S., et al. Low Enthalpy Geothermal Reservoirs in Mexico and Field Experimentation on Binary-Cycle Systems, Geothermal Resources Council Transactions 1985, Vol. 9, pp. 523-526.

- [18] Iglesias E. R., et al. Evaluación de los recursos geotérmicos de temperatura intermedia a baja e identificación de sus aplicaciones, IIE, Cuernavaca, Mor., Informe IIE/11/11780 02/F, 2002.
- [19] Iglesias, E. R., Torres, R. J., Estimación de las reservas geotérmicas de 20 Estados Mexicanos, IIE, Cuernavaca, Mor., Informe IIE/11/11542 01/F, 2004.
- [20] García G. Mapa Nacional de Recursos Geotérmicos 2006, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich., Reporte GF-MX-08-06, 2006. Inedito.
- [21] Iglesias, E. R., Torres, R. J. Primera estimación de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja en veinte estados de México, Geotermia 2009 [Online], Vol. 22, No. 2, p. 54. Disponible: <http://132.248.9.34/hevila/Geotermia/2009/vol22/no2/7.pdf>
- [22] Iglesias, E. R., Torres, R. J. Low to medium temperature geothermal reserves in Mexico. a first assessment, Geothermics 2003 [Online], Vol. 32, p. 711-719.
Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650503000919>
- [23] Torres, V. et al., Geotermia en México, Programa universitario de energía, Universidad Autónoma de México, Mexico, p. 161, ISBN-968-36-3444-3, 1993.
- [24] Flores M., Gutierrez, L. C. A. Geothermal activity and development in Mexico, Short course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants, UNU-GTP and LaGeo, Santa Tecla, El Salvador, 2011.
- [25] Ordaz, C. A. et al., 2011. "Potencial geotérmico de la República Mexicana," Geotermia, Vol. 24-1, pp. 50-58.
- [26] Hiriart, G. Tecnologías de punta y costos asociados para generación distribuida, autoabastecimiento y cogeneración con recursos geotérmicos en México, Energy Sector Management Assistance Program, Reporte Final, 2011.
- [27] Hiriart, G. Evaluación de la energía geotérmica en México. Informe para el banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, 2011.
- [28] Iglesias, E. R., et al., Medium- to low- temperature geothermal reserves of the State of Aguascalientes, Mexico: a partial assessment, Proceedings World Geothermal Congress 2005, paper 0904, Antalya, Turkey, 2005.
- [29] Universidad Politécnica de Baja California, Evaluación de los recursos geotérmicos de baja entalpía de la Península de Baja California, México, UPBC, Mexicali, B. C. N., Reporte Final, 2011.
- [30] E. Almirudis, et al, Caracterización Geoquímica y Estimación de Temperaturas de Equilibrio de Fluidos Termales: Manantiales en la Región Centro-Este de Sonora, México. Presentado en XXII Congreso Nacional de Geoquímica, Coatzacoalcos, Ver., 2012.
- [31] Grupo del Banco Mundial (GBM). Energía y Minería [Ver: <http://datos.bancomundial.org/tema/energia-y-mineria>]; 2014.

- [32] Bertani, R. Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. *Geothermics* 41 (2012): 1-29.
- [33] Matek, B. Geothermal Energy Association 2014 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report, 2014. Pp 25.
- [34] Stober, I., Bucher, K. *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development*. Springer-Verlag, 2013.
- [35] Chandrasekharam, D., Bundschuh J. *Low-enthalpy geothermal resources for power generation*. Taylor & Francis, 2008.
- [36] Schuster, a. et al., “Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications”, *Applied Thermal Engineering*, 29(8-9), pp.1809–1817, 2009.
- [37] Lund, J. W., Freeston, D. H. y Boyd, L. T., “Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review”, *Geothermics*, 40, pp.159–180, 2011.
- [38] Hongguang, J., Bingyu, L., Zhibing, F., Lin, G. y Wei, H., “Integrated energy systems based on cascade utilization of energy”, *Front. Energy Power Eng. China* 2007, 1(1): 16–31, 2007.
- [39] Gazo, F., Lind L. *Low Enthalpy Geothermal Energy- Technology Review*. GNS Science Report 2010, pp. 58.
- [40] Budiarto, R., et al., “Recent Development of Non-Convencional Geothermal Power Plant”, 3rd Applied Science for Technology Innovation, ASTECHNOVA 2014, International Energy Conference, Yogyakarta, Indonesia, 13-14 August 2014.
- [41] Frasher, A. Outlook on principles for projecting of integrated and cascade use of geothermal energy of low enthalpy in Albania. *Proceedings, Twenty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 29-31, 2001 SGP-TR-168*
- [42] C. R. Maya, “Producción Combinada de Electricidad, Calor, Frío y Agua, de Forma Sostenible en el Sector Turístico”, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, Abril 2009.
- [43] Mburu, M., S. Kinyanjui y J. Kenyatta, “Cascaded use of geothermal energy: Eburru Case study”. s.l. : 1-6, Geothermal Development Company Ltd y University of Agriculture and Technology, Kenya, 2012.
- [44] Varet, J. et al., “The “Geothermal Village” concept: a new approach to geothermal development in rural Africa”, 5th African Rift geothermal Conference Arusha, Tanzania, 29-31 October 2014
- [45] Ratlamwala TAH, Dincer I, Gadalla MA. Thermodynamic analysis of an integrated geothermal based quadruple effect absorption system for multigenerational purposes. *Thermochemica Acta* 2012;535:27–35.
- [46] Arrubarrena M, Pelayo L. Potential development zones for geothermal direct uses in Mexico with a specific site recommendation. *GHC Bulletin* 2012:5–8.

-
- [47] Culver G. Fish rearing ponds cascaded from binary power generation. *GHC Bulletin* 2005:18–19.
- [48] Gordon R. Empire energy, Llc. *GHC Bulletin* 2004:11-13.
- [49] Lund JW. Agriculture & aquaculture cascading the geothermal way. *GHC Bulletin* 1994:7–9.
- [50] Kutscher C. Small-scale geothermal power plant field verification projects. GRC Annual Meeting, San Diego, California, 2001 Aug 26–29.
- [51] Glassley WE. Renewable energy and the environment, *Geothermal Energy*, Series Editor, pp 217–218.
- [52] Erickson DC, Kyung I, Holdmann GP. Geothermal powered absorption chiller for Alaska ice hotel, *GRC Transactions* 2005;29:57–60.
- [53] Lund JW. Chena hot springs. *GHC Bulletin* 2006:1-3.
- [54] Holdmann G, Erickson DC. Absorption chiller for the Chena hot springs aurora ice museum. *GHC Bulletin* 2006:5–6.
- [55] Merrick D. The Canby geothermal project : a community-based geothermal development drilling. *GRC Transactions* 2012;36:259–262.
- [56] Lund JW, Chiasson A, Boyd T, Carr D. Myrtle tree geothermal development project – optimal use of cascaded geothermal resources. *Geo-Heat Center*; Sep 2006.
- [57] Merrick D. Canby cascaded geothermal project. U.S. Department of Energy, California–USA; Apr 2013.
- [58] Feng F, Ji-min T. Design on geothermal heating cascade utilization system. *Journal of Hebei Engineering and Technical College*, China, 2008.
- [59] Feng-biao L, Geothermal water multi-cascade comprehensive utilization mode application. *Nonferrous metals Journal*, China, 2009.
- [60] Chun-yi M, Bao-zhen J. Analysis on the development and utilization of geothermal resources and its heating in Tianjin. *Natural Resources Economics of China Journal*, China, 2009.
- [61] Lixin D, Yanxiang Y. The Situation and Prospect Analysis of Cascade Utilization of Geothermal Energy in Qinhuangdao. *Journal of environment Management College of China*, China, 2010.
- [62] Lian-yu F, Hong-pu D, Cheng-ying Q. Case study of cascade use of a heating system using Tertiary geothermal water in Hengshui. *Journal of Hebei University of Technology*, China, 2012.
- [63] Li T, Zhu J, Zhang W. Cascade utilization of low temperature geothermal water in oilfield combined power generation, gathering heat tracing and oil recovery. *Applied Thermal Engineering* 2012;40:27–35.
- [64] Fu W, Zhu J, Zhang W, Lu Z, Performance evaluation of Kalina cycle subsystem on geothermal power generation in the oilfield. *Applied Thermal Engineering* 2013;54:497–506.
- [65] Fu W, Zhu J, Li T, Zhang W, Li J. Comparison of a kalina cycle based cascade utilization system with an existing organic rankine cycle based geothermal power system in an oilfield. *Applied Thermal Engineering* 2013;58:224–233.

- [66] Jiang L, Wang L, Wang R, Gao P, Song F. Investigation on cascading cogeneration system of ORC (Organic Rankine Cycle) and CaCl₂/BaCl₂ two-stage adsorption freezer. *Energy* 2014;71:377–387.
- [67] Jalilinasrabad S, Itoi R, Fujii H, Tanaka T. Cascade uses of geothermal energy in Sabalan – Iran. *Proceedings World Geothermal Congress*; Apr 25–29; Bali, Indonesia; 2010.
- [68] Lund JW, Boyd T. Small geothermal power project examples. *GHC Bulletin* 1999:9–26.
- [69] Hirunlabh J, Thiebrat S, Khedari J. Chili and garlic drying by using waste heat recovery from a geothermal power plant. *GHC Bulletin* 2004:25-27.
- [70] Ramingwong T, Lertsrimongkol S, Asnachinda P, Prasertvigai S. Update on Thailand geothermal energy research and development. *Proceedings World Geothermal Congress*; May 28–Jun10; Kyushu-Tohoku, Japan; 2000.
- [71] Lund JW, Chiasson A. Examples Of combined heat and power plants using geothermal energy. *Proceedings European Geothermal Congress*; May 30-Jun 1; Unterhaching, Germany; 2007.
- [72] Popovski K, Popovska S. Prospects and problems for geothermal use in agriculture in Europe. *Geothermics* 2003;32:545-555.
- [73] Frasher A, Pano N. Outlook on principles for projecting of integrated and cascade use of geothermal energy of low enthalpy in Albania. *International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy*; 2001. pp 249-263.
- [74] Frasher A. Scenarios for integrated and cascade use of geothermal energy of low enthalpy in Albania. *Proceedings European Geothermal Congress*; Jun 1–10; Unterhaching, Germany; 2007.
- [75] Frasher A, Platform for projecting of integrated and cascade use of geothermal energy of low enthalpy in Albania. *The 2nd Joint International Conference on Sustainable and Environment*; 2006 Nov 21-23, Bangkok, Thailand. pp 1–6.
- [76] Frasher A, Cela B, Kodhelaj N, Thodhorjani S. Geothermal energy in the spotlight. *International forum*; Oct 11-12; Thessaloniki, Greece;2009.
- [77] Kodhelaj N, Çela B, Aleti R, Kozani-8 low enthalpy geothermal water use through a cascade and hybrid system. *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)* 2012;1:1–10.
- [78] Nevtan K, Aida B, Bashkim C, Riza A, Spiro T, Rajmonda M. Combined use of the Kozani–8 geothermal water, some thermal and economical calculations. *International Conference Remote Sensing, Environment Transportation Engineering (RSETE 2013)*. pp. 637–640.
- [79] Nevtan K, Aida B, Nevina K, Esmeralda Z, Pirro Z, Rajmonda M. Combined use of the Kozani–8 geothermal water through an integral, cascade and hybrid scheme and its positive effects on the environment , some thermal and economical calculations. *Department of energy resources, Faculty of geology and mining, Tirana, Albania.*

- [80] Nevton K, Aida B, Nevina K, Esmeralda Z, Borana M. Designing of the integral, cascade and hybrid use scheme, for the Kozani-8 geothermal water; some thermal and economical calculations. AASRI Procedia 2012;3:291–298.
- [81] Pernecker G, Uhlig S. Low enthalpy power generation with ORC Turbogenerator. The Altheim Project, Upper Austria. pp 1–7.
- [82] Goldbrunnerl J, Bauerl R, Kolb A, Schubert A, Geothermal cascade use at Geinberg, Austria, Bulletin d'Hydrogéologie 1999;17:209–216 .
- [83] Lund JW. Combined heat and power plant Neustadt-Glewe, Germany. GHC Bulletin 2005:31–34.
- [84] European Commission. Cascade use of geothermal energy for district air conditioning, milk pasteurization, greenhouse heating and cooling storage [updated 2002 Oct 10; cited 2014 Aug 23]. Available from: http://www.cordis.europa.eu/project/rcn/50746_en.html.
- [85] Mendrinou D, Karagiorgas M, Karytsas K. Use of geothermal heat pumps for heating of buildings in Greece. Centre for Renewable Energy Sources (CRES). pp 1-10.
- [86] Geocom. Geothermal Communities – demonstrating the cascading use of geothermal energy for district heating with small scale RES integration and retrofitting measures. Geocom concerto project 239515 – 1st progress report, 2011.
- [87] Geocom. Geothermal Communities – demonstrating the cascading use of geothermal energy for district heating with small scale RES integration and retrofitting measures. Geocom concerto project 239515 – 2nd progress report, 2012.
- [88] Hjartarson H, Maack R, Johannesson F. Energy. Húsavík energy multiple-use of geothermal energy. GHC Bulletin 2005: pp. 7–3.
- [89] Hjartarson H, Gullev L. Húsavík, Iceland-a model of energy efficiency based of geothermal energy. pp 1–6.
- [90] Eliasson ET, Björnsson OB. Multiple integrated applications for low-to-medium-temperature geothermal resources in Iceland. Geothermics 2003;32:4–6.
- [91] Thorolfsson, G. Sudurnes regional heating corporation Svartsengi, Iceland. GHC Bulletin 2005:14–18.
- [92] Ballzus C, Frimmannson H, Gunnarsson GI, Hrolfsson I. The geothermal power plant at Nesjavellir, Iceland. Proceedings World Geothermal Congress; May 28–Jun10; Kyushu-Tohoku, Japan; 2000.
- [93] Lund JW, Cascading of geothermal energy in Italy. GHC Bulletin 1987;10:13–16.
- [94] Popovska, S, Poposki K, Niederbacher. Kocani geothermal district heating system (new activities for proper completion). Proceedings World Geothermal Congress; Apr 24– 25 Antalya, Turkey;2005.
- [95] Bujakowski W. The pilot project of a geothermal heat recuperation cascade system for fish and vegetable breeding, the Pas Meeri geothermal laboratory (podhale region, poland). Proceedings World Geothermal; May 28-Jun 10; Japan; 2000.

- [96] Novak W, Borsukiewicz-Gozdur A, Stachel A. A method of utilising low – and medium – temperature heat sources and media and a system for utilising low – and medium –temperature heat sources and media. Patent WO2009045117A2, Apr 2009.
- [97] Durgău M. Cascading use of geothermal energy with moderate temperature in milk pasteurization plant. *Analele Universitații din Oradea, Fascicula: Ecotoxicologie, Zootehnie și Tehnologii de Industrie Alimentară* 2011;10:521–527.
- [98] Rosca M, Maghiar T. Cascaded uses of the geothermal water at the university of Oradea, Romania. *University of Oradea*. pp 2273–2276.
- [99] Antal C. Optimal utilization of geothermal energy at the University of Oradea, Romania. *United Nations University. Reports* 1995.
- [100] Gavrilesco O, Blaga AC, Rosca M, Antal C, Karytsas K. Cascade use of low enthalpy geothermal water at the university of Oradea. *Proceedings World Geothermal Congress; Apr 25–29; Bali, Indonesia; 2010*.
- [101] Bendea C, Rosca MG, Iacobescu A, Bendea G. Cascaded uses of geothermal water in Iosia district, Oradea, Romania. *Proceedings World Geothermal Congress; Apr 19–25; Melbourne, Australia; 2015*.
- [102] Rajver D, Rman N, Lapanje A, Prestor J. Geothermal Development in Slovenia: Country Update Report 2010-2014. *Proceedings World Geothermal Congress; Apr 19–25 ; Melbourne, Australia; 2015*.
- [103] Arslan O, Kose R. Exergoeconomic optimization of integrated geothermal system in Simav, Kutahya. *Energy Conversion and Management* 2010;51:663–676.
- [104] Teat S. IS Kawerau – Direct heat background study 2012. pp 1–10.
- [105] Stefansson V. Estimate of the world geothermal potential. *Geothermal training program: 20th anniversary workshop, October 1998, The United Nations University*. p. 111–20.
- [106] Stefansson V. *World geothermal assessment. Proceedings world geothermal congress 2005, April 2005. Antalya, Turkey*. p. 24–9.
- [107] Chandrasekharam D, Bundschuh J. *Low-enthalpy geothermal resources for power generation*. Taylor & Francis; 2008.
- [108] WEC (World Energy Council). *World Energy Resources Geothermal; 2016*. <https://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2017/03/WERResources_Geothermal_2016.pdf>[accessed: Feb 25, 2018].
- [109] Walraven D, Laenen B, D'haeseleer W. Comparison of thermodynamic cycles for power production from low-temperature geothermal heat sources. *Energy Convers Manage* 2013;66:220–33.
- [110] Murugan S, Horák B. Tri and polygeneration systems – a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;60:1032–51.
- [111] Jana K, Ray A, Mansouri MM, Assadi De S. Polygeneration as a future sustainable energy solution – a comprehensive review. *Appl Energy* 2017;202:88–111.

- [112] Hongguang J, Bingyu L, Zhibing F, Lin G, Wei H. Integrated energy systems based on cascade utilization of energy. *Front Energy Power Eng Chin* 2007;1(1):16–31.
- [113] Rubio C., Ambriz V. M., Pastor E., Belman J. M. Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources – a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:689–716.
- [114] Dincer I, Rosen M. *Exergy*. 2nd ed. London, UK: Elsevier Science; 2013.
- [115] Yari M. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renewable Energy* 2010;35:112–21.
- [116] Guo T, Wang H, Zhang S. Fluid selection for a low-temperature geothermal organic rankine cycle by energy and exergy. *Power Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*.
- [117] Li J, Pei G, Li Y, Wang D, Ji J. Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures. *Energy* 2012;38:85–95.
- [118] Heberle F, Brüggemann D. Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation. *Appl Therm Eng* 2010;30(11–12):1326–32.
- [119] Habka M, Ajib S. Determination and evaluation of the operation characteristics for two configurations of combined heat and power systems depending on the heating plant parameters in low-temperature geothermal applications. *Energy Convers Manage* 2013;76:996–1008.
- [120] Habka M, Ajib S. Studying effect of heating plant parameters on performances of a geothermal-fueled series cogeneration plant based on Organic Rankine Cycle. *Energy Convers Manage* 2014;78:324–37.
- [121] Fiaschi D, Litshitz A, Manfrida G, Tempesti D. An innovative ORC power plant layout for heat and power generation from medium- to low-temperature geothermal resources. *Energy Convers Manage* 2014;88:883–93.
- [122] Habka M, Ajib S. Investigation of novel, hybrid, geothermal-energized cogeneration plants based on organic Rankine cycle. *Energy* 2014;70:212–22.
- [123] Akbari M, Mahmoudi SMS, Yari M, Roen MA. Energy and exergy analyses of a new combined cycle for producing electricity and desalinated water using geothermal energy. *Sustainability* 2014;6:1796–820.
- [124] Ghaebi H, Parikhani T, Rostamzadeh H, Farhang B. Proposal and assessment of a novel geothermal combined cooling and power cycle based on Kalina and ejector refrigeration cycles. *Appl Therm Eng* 2018;130:767–81.
- [125] Ghaebi H, Farhang B, Parikhani T, Rostamzadeh H. Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a cogeneration system for power and hydrogen production purpose based on TRR method and using low grade geothermal resource. *Geothermics* 2018;71:132–45.
- [126] Akrami E, Chitsaz A, Ghamari P, Mahmoudi SMS. Energy and exergy evaluation of a tri-generation system driven by the geothermal energy. *J Mech Sci Technol* 2017;31(1):401–8.

- [127] Behnam P, Arefi A, Shafii MB. Exergetic and thermoeconomic analysis of a trigeneration system producing electricity, hot water and fresh water driven by lowtemperature geothermal sources. *Energy Convers Manage* 2018;157:266–76.
- [128] Ratlamwala TAH, Dincer I, Gadalla MA. Performance analysis of a novel integrated geothermal-based system for multi-generation applications. *Appl Therm Eng* 2012;40:71–9.
- [129] Li T, Zhu J, Zhang W. Comparative analysis of series and parallel geothermal systems combined power, heat and oil recovery in oilfield. *Appl Therm Eng* 2013;50:1132–41.
- [130] Mohammadi A, Mehrpooya M. Energy and exergy analyses of a combined desalination and CCHP system driven by geothermal energy. *Appl Therm Eng* 2017;116:685–94.
- [131] Akrami E, Chitsaz A, Nami H, Mahmoudi SMS. Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. *Energy* 2017;124:625–39.
- [132] Akrami E, Khazaei I, Gholami A. Comprehensive analysis of a multi-generation energy system by using an energy-exergy methodology for hot water, cooling, power and hydrogen production. *Appl Therm Eng* 2018;129:995–1001.
- [133] Luo X, Wang Y, Zhao J, Chen Y, Mo S, Gong Y. Grey relational analysis of an integrated cascade utilization system of geothermal water. *Int J Green Energy* 2016;13(1):14–27.
- [134] Rubio-Maya C, Pastor E, Ambriz VM, Romero CE, Pacheco-Ibarra JJ. Techno-economic assessment for the integration into a multi-product plant based on cascade utilization of geothermal energy. *Appl Therm Eng* 2016;108:84–92.
- [135] Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Pacheco JJ, Galván GSR, Martínez JP. Analysis of a sequential production of electricity, ice and drying of agricultural products by cascading geothermal energy. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42(28):18092–102.
- [136] Safarian S, Aramoun F. Energy and exergy assessments of modified Organic Rankine Cycles (ORCs). *Energy Rep* 2015;1:1–7.
- [137] Srihirin P, Aphornratana S, Chungparbulpatana S. A review of absorption refrigeration technologies. *Renew Sustain Energy Rev* 2001;5:343–72.
- [138] Gudmundsson JS, Freeston DH, Lienau PJ. The Lindal diagram. *Geotherm Resour Coun Trans* 1985;(9pt 1):15–9.
- [139] Norden B. Geothermal energy utilization in low-enthalpy sedimentary environments, (Scientific Technical Report STR11/06). Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Helmholtz-Zentrum Potsdam; 2011. p. 101.
- [140] Lienau PJ, Lunis BC. Heat exchangers. Geo-Heat center, Oregon Institute of technology; 1991. p. 247–61.
- [141] Quoilin S, Declaye S, Tchanche B, Lemort V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;22:168–86.

- [142] Borsukiewicz-Gozdur A, Nowak W. Comparative analysis of natural and synthetic refrigerants in application to low temperature Clausius-Rankine cycle. *Energy* 2007;32(4):344–52.
- [143] Zhang S, Wang H, Guo T. Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation. *Appl Energy* 2011;88:2740–54.
- [144] Gebreslassie BH, Guillén-Gosalbez G, Jiménez L, Boer D. Design of environmentally conscious absorption cooling systems via multi-objective optimization and life cycle assessment. *Appl Energy* 2009;86:1712–22.
- [145] Kaushik SC, Arora A. Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water–lithium bromide absorption refrigeration systems. *J Refrig* 2009;32:1247–58.
- [146] Wang, L.W., Wang, R.Z., Wu, J.Y., Wang, K., Wang, S.G. Adsorption ice-maker for fishing boat driven by the exhaust heat from diesel engine: choice of adsorption pair. *Energy Convers Manage* 2004;45:2043–57.
- [147] Kaita Y. Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures. *Int J Refrig* 2001;24:374–90.
- [148] Kanoglu M, Bolatturk A. Performance and parametric investigation of a binary geothermal power plant by exergy. *Renewable Energy* 2008;33:2366–74.
- [149] DiPippo, R. Exergy analysis of combined of electricity and direct-heat geothermal.
- [150] Iglesias, E. R., Torres R. J., Martínez-Estrella I., Reyes-Picasso N. Summary of the 2010 assessment of medium to low temperature mexican geothermal resources, *GRC Transact.* 34 (2010) 1155–1160.
- [151] Al Zaharani A. A. Dincer I, Naterer G.F. Performance evaluation of a geothermal based integrated system for power, hydrogen and heat generation, *Int. J. Hydrogen Energy* 38 (2013) 14505–14511.
- [152] Kanoglu M, Dincer I, Rosen M.A. Geothermal energy use in hydrogen liquefaction, *Int. J. Hydrogen Energy* 32 (2007) 4250–4257.
- [153] Kanoglu M, Cengel Y.A. Economic evaluation of geothermal power generation, heating, and cooling, *Energy* 24 (6) (1999) 501–509.
- [154] Graham J, Icemaking plant. Ministry of agriculture, fisheries and food. FAO corporate document repository, Torry Advisory Note No. 68, Accessed from: <<http://www.fao.org/wairdocs/tan/x5940E/x5940e01.htm>>.
- [155] Van Nguyen M, Arason S, Gissurason M, Pálsson P.G. *Uses of Geothermal Energy in Food and Agriculture – Opportunities for Developing Countries*, FAO, Rome, 2015.
- [156] Huddleston-Holmes C, Hayward J. *The Potential of Geothermal Energy*. Australia’s National Science Agency, CSIRO, 2011.

- [157] Esteves-Salas J.R, Geothermal Power Plant Projects in Central America: Technical and Financial Feasibility Assessment Model. MSc Thesis. United Nations University.
- [158] Rosenthal R.E. GAMS – A User Guide, GAMS Development Corporation, Washington, D.C., 2014.
- [159] Havelky, V. Energetic efficiency of cogeneration systems for combined heat, cold and power production. *Int. J. Refrig.* 1999, vol. 22, pp. 479-485.
- [160] Lund, J.W. Characteristics, development and utilization of geothermal resources. *GHC Bull.* (June 2007), pp. 1-9.
- [161] Burnside, B.M. The immiscible liquid binary Rankine cycle. *J. Mech. Eng. Sci.* 1976, Vol.18, pp. 79-86.
- [162] Angelino, G., Colonna, P. Multicomponent working fluids for organic Rankine cycles (ORCs), *Energy* 1998, Vol. 23, pp. 449-463.
- [163] Invernizzi, C., Bombarda, P. Thermodynamic performance of selected HCFs for geothermal applications. *Energy* 1997; Vol. 22; 9, pp. 887-895.
- [164] Hettiarachchi, H.D.M., Golubovic, M., Worek, W.M., Ikegami, Y. Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources. *Energy* 2007; Vol. 32, pp. 1698-706.
- [165] Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., Fischer, J. Working fluids for low temperature organic Rankine cycles. *Energy* 2007; Vol. 32 ; 7, pp. 1210-1221.
- [166] Shengjun, Z., Huaixin, W., Tao, G. Performance comparison and parametric optimization of subcritical organic Rankine cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low temperature geothermal power generation. *Appl Energy* 2011, Vol. 88, pp.2740-54.
- [167] Guo, T., Wang, H.X., Zhang, S. J. Fluids and parameters optimization for a novel cogeneration system driven by low-temperature geothermal sources. *Energy* 2011, Vol.36; 5, pp. 2639-49.
- [168] Zhang, F.Z., Jiang P.X. Thermodynamic analysis of a binary power cycle for different EGS geofluid temperatures. *Appl Therm Eng* 2012, Vol. 48, pp. 476-85.
- [169] Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., Fischer, J. Working fluids for low temperature organic Rankine cycles. *Energy* 2007Vol. 32, pp.1210-21.
- [170] Guo, T., Wang, H., Zhang, S. Comparative analysis of natural and conventional working fluids for use in transcritical Rankine cycle using low-temperature geothermal source. *Int J Energy Res* 2011, pp. 530-44.
- [171] Papadopoulos, A.I., Stijepovic, M.Z., Linke, P. On the systematic design and selection of optimal working fluids for organic Rankine cycles. *Appl Therm Eng* 2010, Vol. 30;6-7, pp.760-9.
- [172] Wei, D.H., Lu, X.S., Lu, Z., Gu, J.M. Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery. *Energy Conversion and Managemrnt* 2007; Vol. 48, pp.1113–1119.
- [173] Dai, Y.P., Wang, J.F., Gao, L. Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery. *Energ Convers Manage* 2009Vol. 50, pp. 576–82.

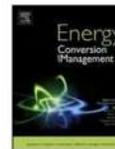
- [174] Schuster, A., Karellas, S., Aumann, R. Efficiency optimization potential in supercritical organic Rankine cycles. *Energy* 2010 Vol. 35, pp.1033–9.
- [175] Sun, J., Li, W.H. Operation optimization of an organic Rankine cycle (ORC) heat recovery power plant. *Appl Therm Eng* 2011, Vol.31, pp. 2032–41.
- [176] Arslan, O., Yetik, O. ANN based optimization of supercritical ORC-binary geothermal power plant: Simav case study. *Appl Therm Eng* 2011, Vol. 31, pp. 3922–8.
- [177] Cayer, E., Galanis, N., Nesreddine, H. Parametric study and optimization of a transcritical power cycle using a low temperature source. *Applied Energy* 2010, Vol. 87, pp. 1349–57.
- [178] Quoilin, S., Declaye, S., Tchanche, B.F., Lemort, V. Thermo-economic optimization of waste heat recovery organic Rankine cycles. *Applied Thermal Engineering* 2011, Vol. 31, pp.2885–93.
- [179] Wang, J., Yan, Z., Wang, M., Ma, S., Dai, Y. Thermodynamic analysis and optimization of an (organic rankine cycle) ORC using low grade heat source. *Energy* 2013, Vol. 49, pp. 356–365.
- [180] Lecompte, S., Huisseune, H., Van den Broek, M., De Schamphelre, S., De Paepe, M. Part load based thermo-economic optimization of the organic rankine cycle (ORC) applied to a combined heat and power (CHP) system. *Applied Energy* 2013, Vol. 111, pp. 871–881.
- [181] Al-Sulaiman, F.A., Dincer, I., Hamdullahpur, F. Thermo-economic optimization of three trigeneration systems using organic Rankine cycles: Part I – Formulations. *Energy Conversion and Management* 2013, Vol. 69, pp. 199-208.
- [182] Al-Sulaiman, F.A., Dincer, I., Hamdullahpur, F. Thermo-economic optimization of three trigeneration systems using organic Rankine cycles: Part II –Applications. *Energy Conversion and Management* 2013, Vol. 69, pp. 209-216.
- [183] Wang, J., Yan, Z., Wang, M., Li, M., Dai, Y. Multi-objective optimization of an organic rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using evolutionary algorithm. *Energy Conversion and Management* 2013, Vol. 71, pp.146–158.
- [184] Pierobon, L., Nguyen, T., Larsen, U., Haglind, F., Elmegard, B. Multi-objective optimization of organic Rankine cycles for waste heat recovery: Application in an offshore platform. *Energy* 2013, Vol. 58, pp. 538-549.
- [185] Astolfi, M., Romano, M.C., Bombarda, P., Macchi, E. Binary ORC (organic rankine cycles) power plants for the exploitation of medium-low temperature geothermal sources - part b: Techno-economic optimization. *Energy* 2014, pp. 1–12.
- [186] Lecompte, S., Lazova, M., van den Broek, M., De Paepe, M. Multi-objective optimization of a low-temperature transcritical organic rankine cycle for waste heat recovery. *10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics* 2014, pp. 372-377.

- [187] Andrasen, J.G., Laern, M.R., Pierobon, L., Larsen, U., Haglind, F. Multi-objective optimization of organic Rankine power plants using pure and mixed working fluids. *Energies* 2016, Vol. 9, pp. 322.
- [188] Buzelin, L. O. S., Amico, S.C., Vargas, J.V.C., Parise, J. A. R. Experimental development of an intelligent refrigeration system. *International Journal of Refrigeration* 2005, Vol. 28, pp. 165-175.
- [189] Arivazhagan, S., Saravanan, R., Renganarayanan, S. Experimental studies on HFC based two-stage half-effect vapour absorption cooling system, *Applied Thermal Engineering* 2006, Vol. 26, 14-15, pp. 1455-1462.
- [190] Herold, K.E., Radermacher, R., Klein, S. *Absorption chillers and heat pumps*, CRC Press 1996, Boca Raton.
- [191] MA, W.B., Xia, H.W., Deng, S.M. Industrial Application of a Two-Stage, Half Effect LiBr/H₂O Absorption Chiller. *Ab-Sorption*, Montreal, Quebec, Canada, 679-683.
- [192] Sumathy, K., Huang, Z. C., Li Z, F. Solar absorption cooling with low grade heat source - A strategy of development in south China, *Solar energy* 2002, Vol. 72, pp. 152-165.
- [193] Kizllkan, Ö., Sencan, A., Kalogirou, S.A. Thermo-economic optimization of a LiBr absorption refrigeration system. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 2007, Vol. 46, pp. 1376-84.
- [194] Chavez-Islas M.L., Heard, C.L. Design and Analysis of an Ammonia/Water Absorption Refrigeration Cycle by Means of an Equation-Oriented Method. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2009, Vol. 48, pp. 1944-56.
- [195] Chavez-Islas, M.L., Heard, C.L., Grossmann, I.E. Synthesis and Optimization of an Ammonia-Water Absorption Refrigeration Cycle Considering Different Types of Heat Exchangers by Application of Mixed-Integer Nonlinear Programming. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2009, Vol. 48, pp. 2972-2990.
- [196] Gebreslassie, B.H., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L., Boer, D. Design of environmentally conscious absorption cooling systems via multi-objective optimization and life cycle assessment. *Applied Energy* 2009, Vol. 86, pp.1712-22.
- [197] Crepinsek, Z. D. G. Comparison of the performances of absorption refrigeration cycles. *Wseas Transactions on Heat and Mass Transfer* 2009, Vol. 4; 3, pp. 65-76.
- [198] Gebreslassie, B.H., Medrano, M., Mendes, F., Boer, D. Optimum heat exchanger area estimation using coefficients of structural bonds: Application to an absorption chiller. *International Journal of Refrigeration* 2010, Vol. 33, pp. 529-37.
- [199] Gebreslassie, B.H., Medrano, M., Boer, D. Exergy analysis of multi-effect water LiBr/absorption systems: From half to triple effect. *Renewable Energy* 2010, Vol. 35, pp. 1773–1782.
- [200] Gomri, R. Solar energy to drive half-effect absorption cooling system, *Thermal & Environmental Engineering* 2010, Vol: 1, pp. 1-8.

- [201] Gebreslassie, B. H.; Groll, E. A.; Garimella, S. V., Multi-objective Optimization of Sustainable Single-Effect Water/Lithium Bromide Absorption Cycle. CTRC Research Publications 2012, Paper 177.
- [202] Dominguez-Inzuza, L.A., Hernandez-Magallanes, J. A., Sandoval-Reyes, M., Rivera, W. Comparison of the performance of single-effect, half-effect, double-effect in series and inverse and triple-effect absorption cooling systems operating with the NH₃-LiNO₃ mixture, Applied Thermal Engineering 2014, Vol. 66, pp. 612-620.
- [203] Arora, A., Dixit, M., Kaushik, S. C. Computation of optimum parameters of a half effect Water-Lithium Bromide vapour absorption refrigeration system. Journal of Thermal Engineering 2016, Vol. 2, pp. 683-692.
- [204] Andritsos, N., Dalampakis, P., Kolios, N, Use of Geothermal Energy for Tomato Drying, District Heating, Agricultural and Agro-industrial Uses of Geothermal Energy, International Geothermal Days GREECE 2002, Thessaloniki, 1-4 September 2002.
- [205] Kumoro, A. C., Krisanto, D, Preliminary study on the utilization of geothermal energy for drying of agricultural product, International Geothermal Conference 2003, paper 001.
- [206] Dincer, I., Sahim, A. Z.A new model for thermodynamic analysis of a drying process. Int. J. of Heat and Mass Transfer 2004, Vol. 47, pp. 645-652.
- [207] Kavak, E. Thermodynamic analysis of strawberry drying process in a cyclone type dryer. Scientific & Industrial research 2007 Vol. 66, pp. 152-161.
- [208] Kostoglou, M., Chrysafis, N., Andritsos, N. Modelling Tomato Dehydration in a Tunnel Dryer Using Geothermal Energy. Drying Technology 2013 Vol. 31, pp. 5-16.
- [209] Andritsos, N., Dalampakis, P., Kolios, N. Use of geothermal energy for tomatoe drying. GHC Bulletin, March 2003, pp. 9-12.
- [210] Lienau, P.J., Lunis, B.C. Heat exchangers. Geo-Heat center, Oregon Institute of technology; 1991. p. 247-61.
- [211] Vázquez, T., Camacho, S., Fernández, M., Fernández, J. Manual del secado solar técnico de alimentos. Energética 1997.
- [212] Zanoni, B., Peri, C., Nani, R., Lavelli, V. Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying. Food Research International 1999; Vol. 31, pp. 395-401.
- [213] Kuppan, T. Heat exchanger design handbook. 2nd revised ed. America: Marcel Dekker Inc.; 2013.
- [214] García-Cascales, J.R., Vera-García, F., Corberán-Salvador, J.M., González-Maciá, J. Assessment of boiling and condensation heat transfer correlations in the modelling of plate heat exchangers. Int J Refrig 2007, Vol. 30, pp. 1029-41.
- [215] Yan, Y.Y., Lio, H.C., Lin, T.F. Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in a plate heat exchanger. Int J Heat Mass Transfer 1999; Vol, 42, pp. 993-1006.

-
- [216] Tesha. Absorption refrigeration system as an integrated condenser cooling unit in a geothermal power plant. MSc Thesis. Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Iceland
- [217] AACE International. Recommended Practice No. 18R-97. Cost Estimate Classification System—As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries. TCM Framework: 7.3—Cost Estimating and Budgeting; AACE International: Morgantown, WV, USA, 2005; p. 10.
- [218] Turton, R.; Bailie R.C.; Whiting W.B.; Shaeiwitz J.A.; Bhattacharyya D. Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes, 4th ed.; Pearson Education International: Upper Saddle River, NJ, USA, 2013.
- [219] Smith, R. Chemical Process: Design and Integration; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2005.
- [220] Ólafsson, T. The use of geothermal heat for refrigeration. University of Iceland, Faculty of Engineering, Iceland, MSc thesis 2007, 108 pp.
- [221] Abbaspour, M., Saraei, A.R. Thermoeconomic Analysis and Multi-Objective Optimization of a LiBr-Water Absorption Refrigeration System. International Journal Environment Research 2015, Vol. 9, 1, pp. 61-68.
- [222] Lund, J. W., Rangel, M. A. Pilot fruit grier for the los Azufres geothermal field, Mexico. Proceeding of the World Geothermal Congress, Florence, Italy, Vol. 3, pp. 2335-2338.

Anexo A: Publicaciones y aportes científicos



Energetic and exergetic performance comparison of different polygeneration arrangements utilizing geothermal energy in cascade



E. Pastor-Martínez^{a,*}, C. Rubio-Maya^a, V.M. Ambríz-Díaz^a, J.M. Belman-Flores^b, J.J. Pacheco-Ibarra^a

^a Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Faculty of Mechanical Engineering, Morelia, Michoacán, Mexico

^b University of Guanajuato, Mechanical Engineering Department, Carretera Salamanca – Valle de Santiago km 3.5 + 1.8 km, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:
Energetic analysis
Exergetic analysis
Polygeneration systems
Geothermal cascade systems

ABSTRACT

In this paper, the energy and exergy performance of several polygeneration arrangements driven by low and medium temperature geothermal resource is investigated. The aim is to assess and compare different coupling schemes, identifying suitable thermally driven technologies for each type of arrangement. The polygeneration system is intended to produce power, cooling and heat for direct uses by considering variations of series and parallel coupling schemes along with different alternatives of ORC and absorption cooling machines. The study was conducted considering a temperature range of low-to-medium geothermal resource from 80 °C to 150 °C. Mathematical models are developed based on first and second law of thermodynamics and solved by means of an equation solver. The results show a threshold temperature that makes a shift between feasible polygeneration arrangements and the type of thermally driven technologies adopted, resulting in two different polygeneration arrangements with highest energetic and exergetic performance. The first arrangement correspond to a temperature range that lies between 80 °C and 110 °C, and the second one between 110 °C and 150 °C. The polygeneration arrangement with highest exergetic performance for the first range of temperatures was the hybrid parallel-series cascade arrangement (HPS2) having exergy efficiencies between 42.82% and 50.11%, while the one corresponding to the second temperature range was the series cascade arrangement (SC1) presenting exergy efficiencies from 51.44% to 52.9%. This effect is a consequence of the available temperature of the geothermal resource and the intrinsic energy performance of the different technologies considered. In regard to thermally driven technologies, arrangements where ORC and TDC subsystems are placed at the first thermal level, are the ones with the highest energetic and exergetic performance. Arrangements that have those components at the last level, present lowest performances.

1. Introduction

Nowadays, the consumption of fossil fuels continues satisfying the world's growing demand for energy, which means environmental impacts and an accelerated depletion of fossil fuel reserves. In recent years, attention has been focused on finding more efficient forms of energy use as well as the use of renewable energies to mitigate environmental problems and other energy issues. On the one hand, among renewable energies, geothermal energy is reported as an abundant and non-intermittent source of thermal energy in different world regions. The geothermal energy potential is 1814 EJ/year, which 403.2 EJ/year are classified as high temperature resources (more than 150 °C) and 1411.2 EJ/year correspond to low-to-medium temperature (between 20 °C and 150 °C) [1–3]. Geothermal resources of high temperature are

being effectively utilized for electricity production and the installed capacity is still growing [4]. However, in spite of the great potential of the low-to-medium temperature geothermal resources, they are not being utilized massively because of technology limitations for using low temperature heat for electricity production, low energy conversion efficiency as well as high investment and production costs [5,6]. Direct or non-electric use of geothermal energy, that is the immediate use of the energy rather than converting it to electricity, is the most common form for using geothermal resources of low temperature. Direct uses include, drying, space heating, cooling, industrial processes, greenhouses, crop drying, balneology and other processes.

On the other hand, several methods aimed to increase the efficient use of energy resources, reduce production costs and to mitigate environmental impacts, have been proposed. These methods include,

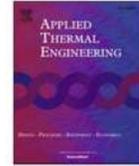
* Corresponding author at: Group of Energy Efficiency and Renewable Energy (GREEN-ER), Mexico.
E-mail address: pastorme@hotmail.com (E. Pastor-Martínez).

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.096>

Received 23 January 2018; Received in revised form 11 April 2018; Accepted 25 April 2018

Available online 10 May 2018

0196-8904/ © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.



Research Paper

Techno-economic assessment for the integration into a multi-product plant based on cascade utilization of geothermal energy



Carlos Rubio-Maya^{a,*}, Edgar Pastor Martínez^a, Carlos E. Romero^b, Víctor M. Ambriz Díaz^a, J. Jesús Pacheco-Ibarra^a

^a Faculty of Mechanical Engineering, Edif. W, CU., Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán C.P. 58030, Mexico

^b Energy Research Center, Lehigh University, 117 ATLSS Drive, Bethlehem, PA 18015, USA

HIGHLIGHTS

- Cascade utilization of low- and mid-temperature geothermal energy is presented.
- The system consists of three thermal levels producing power, ice and useful heat.
- A techno-economic analysis is performed evaluating energy and economic benefits.
- A simple optimization algorithm was developed to optimize system benefits.
- Inconvenience of low thermal efficiency and high capital cost of ORC were overcome.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 April 2016
Revised 15 July 2016
Accepted 16 July 2016
Available online 18 July 2016

Keywords:

Geothermal energy
Cascade utilization
Low- and mid-temperature
Techno-economic
Polygeneration

ABSTRACT

The Organic Rankine Cycle (ORC) is a technology that has reached maturity in cogeneration or waste heat applications. However, due to low thermal efficiency and high capital cost of ORC machines, geothermal-based ORC applications represent only a small percent sharing of the geothermal power capacity worldwide. Several countries have reported a great potential of low- and mid-temperature geothermal energy, representing an opportunity to explore a more efficient ORC integration into non-conventional applications of geothermal energy. One alternative, resembling the polygeneration concept, is known as cascade utilization of geothermal energy, where different energy outputs or products can be obtained at the same time, while improving thermal and economic performance. In this paper, a techno-economic analysis for the selection of small capacity ORC machines and absorption chillers (for ice production), to be integrated into a polygeneration plant that makes use of geothermal energy in a cascade arrangement, is presented. A simple cascade system that consists of three sequential thermal levels, producing simultaneously power, ice and useful heat is proposed, considering typical temperatures of geothermal zones in Mexico. A simple optimization algorithm, based on energy and economic models, including binary variables and manufacturer's data, was developed to evaluate and determine optimal ORC and absorption chiller units. Results show, firstly, that inconvenience of low thermal efficiency and high capital cost of ORC machines can be overcome. Secondly, that the temperature difference in ORC evaporator strongly influences the overall energy efficiency and the economic profit of the system.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Renewable energy sources have significantly become a reality as an alternative to the use of fossil resources and for the reduction of associated adverse effects. The technological and sustainable development of this type of energy can contribute to alleviate

the world's energy need. In this regard, a renewable energy that stands out, due to its potential reserves and technological maturity is geothermal energy [1]. Geothermal resources of high-enthalpy (temperatures higher than 150 °C) have been widely exploited to generate electricity. On the contrary, and despite of the great potential estimated worldwide, resources of low- and medium-enthalpy (less than 100 °C for low temperature and 100–150 °C for medium temperature) have been used in a lower proportion for power generation. This can be attributed to high investment costs and the low thermal efficiency of associated energy

* Corresponding author at: Group of Energy Efficiency and Renewable Energy (GREEN-ER), Mexico.

E-mail address: mrubio@umich.mx (C. Rubio-Maya).



Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources – A review



C. Rubio-Maya^{a,*}, V.M. Ambríz Díaz^a, E. Pastor Martínez^a, J.M. Belman-Flores^b

^a Faculty of Mechanical Engineering, Edif. W, CU. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Group of Energy Efficiency and Renewable Energy (GREEN-ER) Morelia, Michoacán, C.P. 58030, Mexico

^b Department of Mechanical Engineering, Engineering Division, Campus Irapuato-Salamanca, University of Guanajuato Salamanca, Gto., C.P. 36885, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 March 2015

Received in revised form

20 May 2015

Accepted 29 July 2015

Available online 25 August 2015

Keywords:

Geothermal energy

Cascade utilization

Medium and low enthalpy resources

Integrated energy systems

Polygeneration

ABSTRACT

This paper mainly presents a comprehensive review in different regions around the world about the use of geothermal resources of medium and low enthalpy in cascade manner. The utilization of geothermal resources in cascade levels is identified as a mean of sequential operation of geothermal heat by integrating different technologies for electricity generation, distribution and use of thermal energy, drying and dehydration processes, recreational uses, and any other direct-use of geothermal heat. Particularly, this review identifies cascade systems that have been implemented in a practical manner and conceptual systems that have been studied to determine their technical and economic feasibility. It is also observed the recent or in progress research that aims to demonstrate the advantage of using geothermal energy in cascade mode in order to maximize the use of geothermal resources in a rational and sustainable manner. The main features of the systems reported are highlighted, describing briefly the technologies used for these types of systems, temperature of geothermal resources, investment costs, methods of analysis and the main advantages and disadvantages. Finally, a discussion and some remarks are presented stating in general, that the use of geothermal energy in cascade is an effective and sustainable approach to promote the use of geothermal resources of medium and low enthalpy.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Contents

1. Introduction	690
2. The concept of the use of geothermal energy in cascade	691
3. Methodology	691
4. Review by region	692
4.1. Africa	692
4.1.1. Kenya	692
4.1.2. Region summary	692
4.2. America	692
4.2.1. Canada	693
4.2.2. Mexico	693
4.2.3. United States of America	694
4.2.4. Region summary	695
4.3. Asia	697
4.3.1. China	697
4.3.2. Iran	699
4.3.3. Thailand	700
4.3.4. Region summary	700
4.4. Europe	701
4.4.1. Albania	701
4.4.2. Austria	702

* Corresponding author. Tel.: +52 443 322 35 00.

E-mail address: rmaya@umich.mx (C. Rubio-Maya).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.162>

1364-0321/© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.



Análisis exergético convencional aplicado a una planta de poligeneración operando en cascada geotérmica

Conventional exergy analysis applied to a polygeneration plant operating in a geothermal cascade

Ambriz-Díaz Víctor M.

Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia,
Michoacán

Correo: vambriz@umich.mx
<https://orcid.org/0000-0002-2314-2314>

Rubio-Maya Carlos

Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia,
Michoacán

Correo: rmaya@umich.mx
<https://orcid.org/0000-0002-7676-9145>

Pacheco-Ibarra J. Jesús

Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia,
Michoacán

Correo: jjpi15.pacheco@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8265-0861>

Pastor-Martínez Edgar

Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia,
Michoacán

Correo: pastorme@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5083-6258>

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis exergético convencional aplicado a una planta de poligeneración que utiliza energía geotérmica para producir electricidad, enfriamiento y calor útil para deshidratación. La planta de poligeneración opera mediante energía geotérmica de media entalpía y está conformada por varias tecnologías de conversión de energía que operan en tres niveles en una cascada geotérmica. El primer nivel térmico lo constituye un Ciclo de Rankine Orgánico (ORC) con el que se produce electricidad. El segundo nivel térmico está compuesto por una máquina de refrigeración por absorción mediante la que se produce un efecto de enfriamiento para conservación de productos a baja temperatura dentro de una cámara fría, así como para mantener más estable la temperatura de condensación del ORC. La energía térmica del último nivel de la cascada geotérmica se destina para operar un deshidratador. Para determinar las prestaciones energéticas del sistema, la planta de poligeneración se sometió a un análisis de exergía convencional para determinar la exergía destruida en cada componente y de toda la planta. La planta se modeló trabajando bajo parámetros operativos reales, inevitables e ideales para obtener el comportamiento termodinámico bajo diferentes criterios de eficiencia. Los resultados muestran que la planta de poligeneración operando bajo condiciones reales presenta la mayor destrucción de exergía (124.1 kW), la más baja eficiencia exergética (26.9%), y la menor producción de productos energéticos. Los resultados también muestran que teniendo en cuenta las condiciones inevitables, el rendimiento de la planta aumenta hasta alcanzar una eficiencia exergética de 29.6%. Por último, la planta de poligeneración tiene un límite de eficiencia exergética de 77.5%, que corresponde a la operación en condiciones ideales. Los valores obtenidos en este estudio son importantes, ya que marcan una pauta para proponer mejoras de manera individual en componentes y en la planta en general.

Descriptor: Análisis exergético convencional, planta de poligeneración, cascada geotérmica, multi-generación.

Abstract

In this work a conventional exergy analysis applied to a polygeneration plant that uses geothermal energy to produce electricity, cooling and useful heat for dehydration is presented. The polygeneration plant operates using medium enthalpy geothermal energy and is composed by several energy conversion technologies that operate with three thermal levels in a geothermal cascade. The first thermal level includes an Organic Rankine Cycle (ORC) for electricity production. The second thermal level has an absorption refrigeration machine for preservation of agricultural products at a low temperature as well as to maintain more stable the condensation temperature of the ORC. The thermal energy of the last level of the geothermal cascade feeds a dehydrator module. To determine the energy performance of the system, the polygeneration plant was subjected to a conventional exergy analysis calculating the exergy destroyed in each component and the entire plant. The plant was modeled working under realistic, unavoidable and ideal operating parameters to obtain the thermodynamic behavior under different efficiency criteria. The results show that the polygeneration plant operating under real conditions presents the greatest destruction of exergy (124.1 kW), the lowest exergy efficiency (26.9%), and the lowest production of energy products. The results also show that taking into account the unavoidable conditions, the performance of the plant increases up to an exergy efficiency of 29.6%. Finally, the polygeneration plant has an exergy efficiency limit of 77.5%, which corresponds to the operation under ideal conditions. The values obtained in this study are of vital importance since they provide information for proposing improvements individually in components and in the plant as a whole.

Keywords: Conventional exergy analysis, polygeneration plant, geothermal cascade, multi-generation.

IMECE2015-52217

**ANALYSIS OF ALTERNATIVES FOR A MULTIPRODUCT SYSTEM USING
GEOTHERMAL ENERGY UNDER CASCADE UTILIZATION CONCEPT**

Víctor M. Ambriz Díaz
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Michoacana de San Nicolás de
Hidalgo
Morelia, Michoacán, México
vambriz@umich.mx

Carlos Rubio-Maya
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Michoacana de San Nicolás de
Hidalgo
Morelia, Michoacán, México
rmaya@umich.mx

Juan M. Belman-Flores
Dpto. Ing. Mecánica,
Universidad de Guanajuato
Salamanca, Guanajuato, México
jbelman@ugto.mx

Edgar Pastor Martínez
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo
Morelia, Michoacán, Mexico
pastorme@hotmail.com

J. Jesús Pacheco Ibarra
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo
Morelia, Michoacán, Mexico
jjpi15.pacheco@gmail.com

ABSTRACT

Geothermal energy is one of the no fossil energy sources that has been utilized mainly for electricity generation, by using the so-called high enthalpy geothermal resource. Nevertheless, low and medium enthalpy geothermal resources are most abundant, but utilized in less extension due mainly to technological barriers or the thermal match between temperature of energy resources and the technology requirements. This work presents the analysis of alternatives for integrating a multiproduct system, producing sequentially electricity, ice and useful heating. For the purpose, the cascade utilization concept is considered for geothermal energy, utilizing low and medium enthalpy resources. To carry out the analysis, it is assumed availability of geothermal hot water with different temperatures typical of already drilled geothermal wells or studied geothermal reservoirs in Mexico. In order to produce electricity, ice and heating for further use (dehydration process or greenhouse heat supply), three cascade levels are proposed to operate sequentially and simultaneously. For electricity generation Organic Rankine Cycles are considered, and for ice production, thermally activated technologies are the best candidates. If necessary, supplementary heat is provided as a mean of geothermal energy upgrade; among the technologies to integrate are parabolic trough collectors, linear Fresnel collectors and biomass boiler. Particularly, with regard to Organic Rankine Cycles, are considered the ones that works

with geothermal hot water in the range of 90 °C to 125 °C with rated power output between 25 kWe to 250 kWe. For ice production, two type of machines are under study, i.e. single-effect absorption machines with coefficient of performance around 0.6, and half-effect absorption machines with a value around 0.3 for the coefficient of performance. Absorption machines can be activated thermally with geothermal hot water with temperature in the range of 70 °C to 90 °C. Afterwards, a number of alternatives are proposed to integrate the multiproduct system, which are analyzed and compared both from the energy and economic point of view, obtaining in this way the main energy interactions of the systems, including electricity produced, amount of ice produced and heat availability. In the model, economic indicators are evaluated, obtaining for each alternative the capital cost, simple payback and net present value. Results shows quantitatively that cascade use of geothermal energy is a viable concept to increase the use of low and medium enthalpy geothermal resources with increase of energy performance and improvement of economical profit.

Keywords: polygeneration, geothermal cascade use, low and medium enthalpy, multiproduct system



SELECTION OF SMALL CAPACITY ORC SYSTEMS FOR INTEGRATING OF A POLYGENERATION PLANT WITH CASCADE USE OF GEOTHERMAL ENERGY

Edgar Pastor^{1*}, Carlos Rubio¹, J. Jesús Pacheco¹, Víctor Ambríz¹

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Faculty of Mechanical Engineering
Group of Energy Efficiency and Renewable Energy (GREEN-ER)
Santiago Tapia #403, 58000, Morelia, Michoacán, México.

Abstract

The ORC technology in cogeneration systems has by now reached a level of full maturity. In geothermal applications it is well accepted, with an 8% share of geothermal power capacity installed worldwide. Moreover geothermal resources of medium and low temperature (below 150 °C) are the most abundant in the world, Mexico for its geological characteristics has great potential for these resource types. Due to this fact there is a need to consider geothermal development to meet the demand for electrical power and energy of the human settlements close to these resources. An alternative is cascade use of medium and low temperature geothermal energy in a multi-product concept. This paper evaluates and discusses a methodology for technology selection and optimization for the integration of poly-generation plants with cascade use of geothermal energy. The basic scheme used for multi-product concept with cascade use of geothermal energy consists of three energy levels with three main technologies respectively. An energy analysis is performed considering geothermal resources in the temperature range 80 to 130 °C, typical of different zones in Mexico. Preliminary techno-economic analysis is performed to carry out the evaluation and selection of main technologies. For this purpose, an optimization code based on binary variables and manufacturer's information was created in order to define the optimal combination for different situations of geothermal resource. The energy analysis defines some general considerations for selection of ORC cycle and guidelines to integrate with other geothermal cascade uses. In particular, the selection of ORC is established to reach maximum efficiency and lowest capital cost via optimization. All assumptions for system components performance calculation are set on the basis of literature data and datasheets of real power plants.

Keywords: ORC, Geothermal Energy, Cascade Use, Medium and Low Enthalpy.

1. Introduction

In the context of a better utilization of renewable energy such as geothermal energy, it is important to consider the high-energy prices, scarcity of hydrocarbons altogether with the negative environmental considerations associated [1]. As a measure to maximize the use of resources of medium and low enthalpy, both for electricity generation and for direct utilization, the use of geothermal energy under cascade concept has been proposed. The use of energy in cascade manner is no more than a reasonable arrangement of the use of energy at different thermal levels to obtain different products. Cascade utilization matches to a particular case of integrated energy systems, which also appear under the name of polygeneration systems, which focus on the principle of using one or more energy resources to provide various products more efficiently than the conventional systems [2, 3, 4].

Schemes or arrangements with cascade use of the geothermal energy usually make use of the geothermal resource (medium enthalpy) generally in the first level of the cascade for electricity production. Subsequently, the geothermal resource that comes out of this process feeds the second level of the cascade for cooling purposes using Thermally Activated Technologies (TAT), such as absorption or adsorption chillers. After this second use, the fluid can be used for other purposes with lower temperature requirements to form the third level of the cascade.

On the other hand, considering the geological context of Mexico, fluids with medium and low enthalpy characteristics can be obtained from shallow wells using similar techniques as those for water drilling wells. Among the geothermal energy resources, systems of medium and low enthalpy water dominated, with temperatures between 60 °C and 151 °C, are the most abundant in Mexico, with about 90% of the thermal manifestations reported [5]. In this sense, the ORC technology allows electricity production from fluids at moderate temperatures (between 80 °C to 150 °C), making this technology the best energy conversion systems to utilize medium and low enthalpy geothermal resource, both from a technical and environmental perspective. Additionally, ORC technology is mature and relative simple with total installed power worldwide of about 700 MWe, representing about 8% of the geothermal power installed [6].

* Corresponding Author: pastorme@hotmail.com

OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA DE UN SISTEMA DE POLI-GENERACION GEOTERMICO EN CASCADA

MC. Edgar Pastor Martínez¹, Dr. Carlos Rubio Maya²,
MC. Víctor Manuel Ambríz Díaz³ y Dr. Jesús Pacheco Ibarra⁴

Resumen— En este estudio se realiza una optimización paramétrica de un sistema de poligeneración geotérmica en cascada en el rango de temperaturas entre 80 y 150 °C. El sistema analizado consiste en un subsistema basado en un Ciclo Rankine Orgánico, un subsistema de enfriamiento impulsado térmicamente e intercambiadores de calor para usos directos. Los principales objetivos de este trabajo son identificar los fluidos apropiados a través de los cuales la electricidad y el frío se pueden producir con alta eficiencia. El procedimiento de optimización fue modelado en EES® usando cuatro Indicadores: eficiencia térmica, eficiencia exergética, eficiencia de utilización y costo de inversión. El rendimiento de los fluidos de trabajo de los subsistemas fueron evaluados y comparados con sus parámetros operativos internos optimizados simultáneamente. La optimización proporciona resultados diferentes a los obtenidos en el análisis termodinámico, confirmando la importancia primordial de la optimización combinada termodinámica y económica de la planta de poli-generación.

Palabras clave—Energía geotérmica, uso en cascada, poli-generación, baja y mediana temperatura, optimización.

Introducción

Actualmente existe una necesidad global del uso eficiente de la energía y la reducción de las emisiones de gases contaminantes. El propósito de este estudio es hacer frente a estos problemas mediante el desarrollo de un marco de modelado y optimización que se pueda implementar para dar una guía en la planificación y el diseño de sistemas de poli-generación con el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpía a diferentes niveles, que son un tipo de sistemas de energía de generación con un gran potencial para hacer frente a los problemas energéticos y ambientales, especialmente en el corto y mediano plazo. El objetivo de este estudio es presentar una evaluación termodinámica y optimización del sistema de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía geotérmica de mediana y baja entalpía basado en diferentes configuraciones de los ciclos que la integran, identificando los fluidos adecuados a través de los cuales la electricidad y la refrigeración pueden ser generados con alta eficiencia y para obtener el mejor costo-beneficio.

El sistema de poli-generación alimentado por energía geotérmica consta de tres subsistemas, el subsistema de generación de potencia, el subsistema de refrigeración y el subsistema de deshidratación, como se muestra en la Figura 1. El subsistema ORC considera la aplicación de diferentes opciones del ciclo tales como son los ciclos subcrítico y supercrítico, además de las disposiciones del ciclo simple, con IHE y con extracción en la turbina. En cuanto al fluido de trabajo para el subsistema ORC, consideramos una variedad de fluidos orgánicos (Cuadro 1) con propiedades termodinámicas que nos brindan un buen desempeño y un impacto negativo bajo en el medio ambiente. El efecto de enfriamiento se puede lograr usando máquinas de enfriamiento por absorción con pares de trabajo agua-amoniaco y bromuro de litio-agua. En este estudio solo tres posibilidades se consideran como alternativas: refrigeración por absorción de simple efecto con bromuro de litio-agua, de simple efecto con amoniaco-agua y de medio efecto amoniaco-agua. El subsistema que se utiliza para el uso directo en el tercer nivel, es simplemente un intercambiador de calor de agua caliente con una temperatura de aprovechamiento cercana a los 70 °C de acuerdo con Gazo y Lind (2010), el intercambiador cede su energía térmica al aire que entra al deshidratador. Para este análisis consideramos como base la planta de secado de jitomates a pequeña escala ubicada en Nea Kessani, Xanthi, Grecia. Los jitomates se secan con agua caliente geotérmica en módulos tipo secador de túnel rectangular de 14 m de largo (1 m de ancho y 2 m de alto), de acero inoxidable con bandejas de 100 × 50 cm de acero inoxidable como lo hicieron Andritsos et al (2003).

¹ El MC Edgar Pastor Martínez es candidato a Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. pastorme@hotmail.com (**autor corresponsal**)

² El Dr. Carlos Rubio Maya es Profesor Investigador en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. rmaya@umich.mx

³ El MC Víctor Manuel Ambríz Díaz es estudiante de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. vmad12@live.com.mx

⁴ El Dr. J. Jesús Pacheco Ibarra es Profesor Investigador en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. jipi15.pacheco@gmail.com

Simulación off-design de una planta de poligeneración operando en cascada geotérmica

M.C. Víctor Manuel Ambriz-Díaz¹, Dr. Carlos Rubio-Maya², M.C Edgar Pastor-Martínez³, M.I. Hugo Cuauhtémoc Gutiérrez-Sánchez⁴, M.C. Carlos Rene Ramírez-Ferreira⁵

Resumen—Este trabajo presenta el diseño y la simulación off-design de una planta de poligeneración que opera en cascada geotérmica. La planta de poligeneración opera simultáneamente mediante tres componentes principales para producir tres productos diferentes (electricidad, frío y calor útil). Los componentes son un ciclo Rankine orgánico (ORC) de 40 kW_e, una máquina de enfriamiento de absorción de 175 kW_t y un deshidratador con capacidad de secado de producto fresco de 1 Ton/día. El objetivo del trabajo es simular las condiciones en diseño y fuera de diseño los componentes de la planta poligeneración y obtener los resultados del funcionamiento de la instalación para diferentes condiciones de operación. Los resultados para la operación en condiciones fuera de diseño indican que no hay cambios drásticos en el rendimiento global de la planta geotérmica, por lo que la generación de productos de la planta prácticamente no se observa afectada.

Palabras clave—Modelo de diseño, simulación, planta de poligeneración, cascada geotérmica.

Introducción

En la actualidad los recursos geotérmicos de media y baja entalpía son importantes candidatos para la producción de múltiples productos, entre ellos electricidad, mediante su aplicación en las innovadoras plantas de poligeneración en cascada (Angrisani et al. 2016). El concepto de poligeneración en cascada se ha propuesto como una medida para potenciar el uso de los recursos de mediana y baja entalpía, tanto para la generación eléctrica como para usos directos. Este concepto surge a mediados de los años 80's con el fin de hacer un uso más efectivo de la energía geotérmica a diferentes niveles de temperatura. En términos generales, la utilización en cascada de la energía no es más que un arreglo razonable del uso de la energía a diferentes niveles térmicos para obtener diversos productos (Pan et al. 2019).

Por lo anterior, el diseño y la operación de las plantas de poligeneración y las tecnologías que las integran se han evaluado desde diferentes perspectivas científicas y prácticas. Dentro de las aplicaciones prácticas se encuentra la planta geotérmica en cascada instalada en Canby, CA, la central eléctrica en conjunto con una planta para deshidratación de cebolla y ajo en Nevada, el sistema en cascada para conservar la temperatura de un museo de hielo y la temperatura en una piscina en Alaska, la planta ciclo Kalina en Husavik donde el calor residual se emplea en usos directos, entre otras (Rubio-Maya et al. 2015). Por otra parte desde la perspectiva científica en relación a las tecnologías candidatas para integrar una planta de poligeneración. Hu et al. (2015) han presentado el diseño preliminar y análisis de rendimiento fuera de diseño de un ORC para fuentes geotérmicas. Kim et al. (2017) han realizado análisis de rendimiento fuera del diseño del ciclo Rankine orgánico utilizando datos de operación reales de una planta como fuente de calor. Hu et al. (2015) han comparado el rendimiento fuera del diseño de un ORC bajo diferentes estrategias de control. Kalenius (2007) realizó el análisis fuera del diseño de un sistema de refrigeración por absorción de vapor. Li et al. (2018) realizaron el modelo de diseño y simulación de un sistema de enfriamiento híbrido de absorción y compresión.

Con base en la revisión de literatura se aprecia que la literatura carece de modelos de diseño y simulación (modelo fuera de diseño) de plantas de poligeneración que utilicen la energía geotérmica para activarse. El presente trabajo tiene como objetivo llenar ese hueco existente en la literatura. La motivación de este trabajo ha resultado por la forma innovadora en la que se emplea el recurso geotérmico por las tecnologías que integran la planta de poligeneración. La innovación de este trabajo es que no se han reportado referencias de alguna instalación de

¹ M.C. Víctor Manuel Ambriz-Díaz es Estudiante de Doctorado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. vambriz@umich.mx

² Dr. Carlos Rubio-Maya es Profesor investigador en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. rmaya@umich.mx

³ M.C. Edgar Pastor-Martínez es Estudiante de Doctorado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. pastormec@hotmail.com

⁴ M.I. Hugo Cuauhtémoc Gutiérrez-Sánchez es Profesor investigador en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. hcgshan@umich.mx

⁵ M.C. Carlos Rene Ramírez-Ferreira es Estudiante de Doctorado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. sitec.vu@live.com.mx

Medium and low enthalpy geothermal energy cascade use concept: A promising solution in development in local areas with geothermal resources in Mexico.

ORAL

E. Pastor Martínez^{1*}, C. Rubio Maya¹, J. J. Pacheco Ibarra¹, J. M. Belman Flores²,

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH, Santiago Tapia #403, CP 58000, Morelia, Michoacan.

²Deprtamento de Ingeniería Mecánica, Carretera Salamanca - Valle de Santiago Km 3.5 + 1.8 Km comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato.

*e-mail corresponding author: pastorme@hotmail.com

ABSTRACT

Rapid growth of energy consumption, depletion of energy resources and environmental impacts associated, have caused great concern and attention to these aspects, giving much importance to efficient energy systems integration. So in addition to the development of geothermal power generation to meeting the electricity demand of the country through the interconnected network, also must be considering geothermal development to meet electricity and energy demand near sites with medium and low enthalpy geothermal resources. Moreover geothermal resources of medium and low temperature (below 150 °C) are the most abundant in the world, for its geological characteristics Mexico has great potential for this type of resource. Medium and low enthalpy geothermal energy cascade use concept aims to respond to the above needs. To carry out the proposal of a suitable conceptual system to the Mexican case, previously characteristics of the geothermal resources of medium and low enthalpy were identified, mainly emphasizing its temperature level and location. In some of these places geothermal resources are available and can be used for small or medium-sized developments. Medium and low enthalpy geothermal energy cascade use concept includes shallow geothermal wells use, production of electricity with ORC binary plants of small capacity, cold production for ice making or food preservation, heat production for drying foods, production of geothermal fluids and other applications such as ecotourism and bath. The feasibility study of these systems shows that a project of this type responds to the needs of nearby geothermal resources of medium and low enthalpy local settlements.

Keywords: Geothermal energy, cascade use, medium and low enthalpy.

Energy and exergy analysis and comparison of different configurations of geothermal-fuelled poly-generation systems

Édgar Pastor-Martínez, Carlos Rubio-Maya, J. Jesús Pacheco-Ibarra, and H. Cuauhtémoc Gutiérrez-Sánchez

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio W, Ciudad Universitaria, Morelia, 58030, Mich., México. Email: epastor@umich.mx

ABSTRACT

This paper presents and investigates several configurations of poly-generation systems fuelled by medium and low temperature geothermal water. Poly-generation has become an option that is being explored intensively to be implemented in geothermal systems of different countries, since it offers the possibility to increase the use of geothermal energy by generating electric power, thermal energy, refrigeration or air conditioning (or other forms of usable energy) simultaneously, from a single source of primary energy. In this study, different configurations of poly-generation systems are developed and modeled that allow to analyze and select a system of auto-generation, to replace conventional forms of energetic supply, based on technological energy proposals and exergetic analysis. These poly-generation systems consist of a subsystem based on an Organic Rankine Cycle (ORC), a cooling subsystem based on an absorption machine with Thermally Activated Technology (TAT) and heat exchangers for energy direct uses. The main objectives are to identify the best configuration to produce electricity, cold and heat with higher efficiency, as well as to determine opportunity areas to improve each of the system configurations. A detailed energy and exergy analysis is performed in the EES software environment taking into account geothermal sources at the temperature range of 80-150°C. The developed codes allow a wide energetic and exergetic analysis of different configurations of cycle-arrangements that integrate poly-generation systems. Finally, a poly-generation configuration that satisfies energetic requirements posed with the intention to improve geothermal energy use efficiency, based on energy and exergetic performance parameters is selected.

Keywords: Low-to-medium temperature resources, modeling, ORC, TAT, efficiency, EES software.

Análisis de energía y exergía y comparación de diferentes configuraciones de sistemas de poli-generación que usan recursos geotérmicos

RESUMEN

Se presentan e investigan varias configuraciones de sistemas de poli-generación que emplean agua geotérmica de temperatura baja a media. La poli-generación se ha vuelto una opción cada vez más estudiada para su implementación en sistemas geotérmicos de diferentes países, ya que ofrece la posibilidad de incrementar el uso de la geotermia generando energía eléctrica, energía térmica, refrigeración o acondicionamiento de espacios (u otras formas útiles de energía) de manera simultánea, a partir de una sola fuente de energía primaria. En este estudio se desarrollaron y modelaron diferentes configuraciones de sistemas de poli-generación que permiten analizar y escoger un sistema de autogeneración para sustituir fuentes convencionales de oferta energética, con base en propuestas tecnológicas energéticas y análisis exergéticos. Estos sistemas de poli-generación consisten de un subsistema basado en un Ciclo Rankine Orgánico (ORC), un subsistema de enfriamiento basado en una máquina de absorción con Tecnología Activada Térmicamente (TAT) e intercambiadores de calor para usos directos de energía. Los objetivos principales son identificar la mejor configuración para generar electricidad, frío y calor con alta eficiencia, así como encontrar áreas de oportunidad para mejorar cada una de las configuraciones. Se realizó un análisis energético

Uso en cascada de la energía geotérmica para producir electricidad, calor y frío

V. M. Ambriz Díaz¹, C. Rubio Maya¹, E. Pastor Martínez¹

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Santiago Tapia
403, C.P. 58000, Morelia, México
vambriz@umich.mx

Área de participación: Ingeniería Química

Resumen

Este trabajo trata de abordar la sostenibilidad aplicada a la energía geotérmica de media temperatura. Se describe el concepto de uso integrado de múltiples aplicaciones de la energía geotérmica, tal es el caso de la utilización en cascada. Se muestra un análisis de un sistema multiproducto en cascada con el que se puede generar electricidad a partir de un ORC, generar frío mediante una máquina de absorción y producir energía térmica para un conjunto de invernaderos así como agua caliente sanitaria para viviendas. Se realiza el análisis energético y exergético en el software EES[®] (Engineering Equation Solver) y un modelado en MATLAB[®] para determinar el comportamiento de la temperatura interior en un conjunto de invernaderos y del tanque de agua caliente, considerando en el análisis que se dispone de energía geotérmica de media entalpia con 150 °C, como recurso primario. Finalmente, se presenta un estudio económico y se cuantifica la cantidad de energía que se puede obtener en forma de calor útil, electricidad y frío, a partir de dicho recurso geotérmico.

Palabras clave: *Energía geotérmica, uso en cascada, electricidad, calor*

Abstract

This work presents the sustainability concept applied to mid-enthalpy geothermal energy resource. The concept of integrated multi-purpose systems of geothermal energy through cascading concept it described. It is also presented the cascade analysis of the multi-product system with electricity production from ORC cycle, cooling from absorption machine and thermal energy for greenhouses and hot water for homes. It is carried out the energy and exergy analysis using EES[®] software and MATLAB[®] modeling in order to determine the behavior of the greenhouse applications and hot water tank. It is assumed that it is available a geothermal resource considered as medium enthalpy with 150 °C. Finally, it is presented an economic study quantifying the energy produced in the different form: electricity, thermal energy and cold.

Keywords: *Geothermal, cascading use, electricity, heat*