



**Universidad Michoacana de San Nicolás
de Hidalgo**

**Facultad de Ingeniería Mecánica
División de Estudios de Posgrado
Área de Termodinámica**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA
FACULTAD DE
INGENIERÍA MECÁNICA**



Integración en Cascada de la Energía Geotérmica para la Generación de Electricidad, Calor y Frío

T E S I S

**Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias en
Ingeniería Mecánica**

Presenta:

Ing. Víctor Manuel Ambríz Díaz

Asesores:

**Dr. en Energías Renovables y Eficiencia Energética:
Carlos Rubio Maya**

**Dr. en Ingeniería Mecánica:
José Martín Medina Flores**

Morelia Michoacán; Mayo 2014

Resumen

La demanda energética aumenta a medida que crecen las necesidades tecnológicas de los seres humanos. Es inevitable dejar de consumir energía, inconvenientemente esta energía generalmente en su mayor parte proviene de un recurso no renovable (combustible fósil). Siendo este tipo de combustibles la principal causa del cambio climático. Adicionalmente, el calentamiento global es atribuible a la actividad humana y a los procesos ineficientes de transformación de la energía, principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero. La baja eficiencia energética en los procesos convencionales de transformación de la energía, incrementa el consumo de la misma y por consiguiente los precios y las emisiones a la atmósfera de gases nocivos. La producción de energía en base a energías renovables aún se encuentra en etapa de maduración, siendo la energía geotérmica una de las más utilizadas. En este trabajo, se muestra un análisis y configuración de un proceso que optimiza el uso de la energía geotérmica con una implementación en cascada. Se presenta un sistema multiproducto en cascada con el que se puede generar electricidad a partir de un ORC (Ciclo Rankine Orgánico), frío mediante una máquina de absorción y calor para un conjunto de invernaderos y para aplicaciones de ACS (Agua Caliente Sanitaria) en un conjunto de viviendas. Además, se realiza el análisis energético y exergético del sistema utilizando energía geotérmica de media entalpía (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 y frío.

Abstract

Energy demand increases with growing technological needs of human beings. Inevitably stop using energy, energy is generally inconveniently mostly comes from non-renewable (fossil fuel) resources. Being this type of fuel the main cause of climate changes. Additionally, global warming is attributable to human activity and inefficient processes of transformation of energy, primarily by the emission of greenhouse gases. The low energy efficiency in conventional processes of transformation of the energy consumption increases and therefore the same prices and emissions of harmful gases. Energy production based on renewable energy is still in stage of maturation, geothermal energy being one of the most used. In this paper, an analysis and configuration process that optimizes the use of geothermal energy with a cascade implementation is shown. A multi- cascade system with which you can generate electricity from an ORC (Organic Rankine Cycle), cold is presented through an absorption chiller and heat for a set of greenhouses and applications DHW (Domestic Hot Water) in a housing . Besides the energy and exergy analysis of the system using medium enthalpy geothermal energy (150 ° C) is performed as a primary resource. Finally, an economic study is presented and the amount of energy that can be obtained in the form of useful electricity and cold heat, from said geothermal resource is quantified.

Keywords: Geothermal Energy, cascading use, electricity, heat and cold.

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a Dios, a la Virgen de Guadalupe y San Judas Tadeo por haberme puesto y guiado por este camino.

A mi padre Jesús Ambriz por sus sacrificios y luchas por sacarme adelante.

A mi madre Carolina Díaz por su gran cariño.

A mis hermanos por su apoyo y solidaridad.

A mi Asesor Dr. Carlos Rubio por sus grandes consejos y enseñanzas.

A mis Sinodales por sus consejos y apoyo en la elaboración y mejora de este trabajo.

A mis amigos por su gran compañerismo y apoyo en momentos difíciles.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por su apoyo para culminar este gran paso en mi vida.

A todos y cada uno, muchas gracias.

Índice general

Resumen	III
Abstract	V
Agradecimientos	VII
Índice general	XI
Índice de figuras	XVI
Índice de tablas	XVIII
Nomenclatura	XIX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación energética actual	1
1.1.1. Contexto mundial	4
1.1.2. Situación en México	5
1.2. Energía geotérmica y desarrollo sostenible	8
1.2.1. Energía geotérmica en el mundo	9
1.2.2. Energía geotérmica en México	11
1.3. Potencial geotérmico en el Estado de Michoacán	12
1.4. Antecedentes	14
1.4.1. Breve historia	14
1.4.2. Estado del arte	16
1.5. Definición del problema	22
1.6. Justificación	23
1.7. Objetivo	23
1.7.1. Objetivos específicos	23

1.8. Hipótesis	24
2. ENERGÍA GEOTÉRMICA Y SU USO EN CASCADA	25
2.1. La energía geotérmica	25
2.2. Clasificación del recurso geotérmico	25
2.2.1. Características de los sistemas geotérmicos	28
2.3. Usos directos de la energía geotérmica	31
2.3.1. Natación, baños y balneología	32
2.3.2. Calefacción de edificios y producción de ACS	33
2.3.3. Calefacción de invernaderos	34
2.3.4. Acuicultura y crianza de animales	36
2.3.5. Secado de alimentos y maderas	37
2.3.6. Otras aplicaciones	38
2.4. Usos para generación de electricidad	39
2.4.1. Ciclos de vapor seco	39
2.4.2. Plantas flash	41
2.4.3. Ciclos binarios	42
2.4.4. Ciclo ORC	44
2.4.5. Ciclo Kalina	46
2.5. Utilización en cascada	46
2.5.1. Analogía con los esquemas multiproducto	47
2.6. Refrigeración por absorción	49
3. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA MULTIPRODUCTO PARA LA GENE- RACIÓN EN CASCADA	51
3.1. Esquema conceptual del sistema en cascada	51
3.1.1. Esquema simplificado y suposiciones	53
3.1.2. Elección de la unidad de potencia	54
3.1.3. Elección de la unidad enfriadora	55
3.1.3.1. Elección de la cámara de enfriamiento	56
3.1.4. Elección del uso térmico directo	57
3.1.4.1. Invernadero	60
3.1.4.2. ACS	61
3.2. Diseño básico del sistema para uso en cascada de la energía geotérmica	64
3.2.1. Dimensiones preliminares y parámetros básicos del sistema	65

3.2.2. Datos del pozo geotérmico	65
3.3. Análisis energético del sistema en cascada para generación de electricidad, calor y frío	66
3.4. Análisis termodinámico del sistema	69
3.4.1. Modelo termodinámico del ciclo ORC	70
3.4.2. Modelo termodinámico del ciclo de absorción	71
3.4.2.1. Análisis de la cámara frigorífica	73
3.4.3. Modelo de uso del calor en invernadero	74
3.4.4. Modelos para el uso de ACS	77
3.5. Análisis exergético del sistema en cascada	78
3.5.1. Análisis exergético del ciclo ORC	79
3.5.2. Análisis exergético del ciclo de absorción	80
3.5.3. Análisis exergético en el invernadero	81
3.5.4. Análisis exergético para el uso de ACS	81
4. ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DEL SISTEMA EN CASCADA	83
4.1. Estimación de costos de inversión y O&M	83
4.1.1. Estimación de Costos de Inversión	83
4.1.2. Costos de operación y mantenimiento (O&M)	87
4.2. Análisis técnico-económico	87
4.2.1. Evaluación del ahorro de energía primaria	87
4.2.2. Evaluación de la reducción de gases de efecto invernadero	90
4.2.3. Valor Actual Neto	92
4.2.4. Período de Retorno Simple	93
4.2.5. Tasa Interna de Retorno	93
4.3. Análisis exergoeconómico con enfoque de Tsatsaronis	94
5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	97
5.1. Resultados del análisis energético	97
5.2. Resultados del análisis termodinámico	99
5.2.1. Ciclo Rankine Orgánico	99
5.2.2. Ciclo de refrigeración por absorción $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$	102
5.2.3. Calefacción de invernaderos	103
5.2.4. ACS para viviendas	114
5.3. Resultados del análisis exergético del sistema en cascada	116

5.3.1. Análisis exergético por equipos en el ORC	117
5.3.2. Análisis exergético por equipos en la máquina de absorción	118
5.4. Resultados del análisis económico	120
5.5. Resultados IAEP y RGEI	121
5.6. Resultados del analisis exergoeconómico	122
CONCLUSIONES	125
Bibliografía	127
A. Tecnologías para la generación de electricidad apartir de recursos de baja temperatura	135
A.1. Tecnología ORC	135
A.2. Ciclo Kalina	135
B. Tecnologías para la generación frio y formas de producirlo	139
B.1. Máquinas de absorción	139
B.1.1. Máquinas de simple efecto	139
B.1.2. Máquinas de doble y triple efecto	139
B.1.3. Coeficiente de operación (COP)	140
B.1.4. Pares de trabajo	140
B.1.4.1. Agua-amoniaco ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$)	140
B.1.4.2. Bromuro de litio-agua ($\text{LiBr- H}_2\text{O}$)	141
B.2. Producción de hielo y características	142
B.2.1. Formas de producirlo	143
B.2.2. Fabricación del hielo a nivel industrial	143
B.2.2.1. Modo de operación	144
C. Tecnologías para invernaderos y productos	147
C.1. Tecnologías para calefacción	147
C.1.1. Mediante suelo radiante	147
C.1.2. Aerotermos	149
C.1.3. Calentadores de aire para colgar (combustión)	153
C.2. Tecnologías para construcción (tipos)	155
C.2.1. Tecnologías para invernaderos-México	155
C.2.2. Cronología de adopción de tecnología para invernaderos en México . .	156

C.2.3. Tecnología mexicana	156
C.2.4. Principales modelos de invernaderos de acuerdo a la zona y al cultivo	158
C.3. Producción de jitomate	164
C.3.1. Temperatura	165
C.3.2. Aspectos generales a considerar en la producción de tomate en invernadero	166
D. Tecnologías y producción ACS	171
D.1. Producción ACS	171
D.1.1. Producción instantánea	171
D.1.2. Producción con acumulación	173
D.2. Tecnologías y fabricantes	174
D.2.1. Intercambiadores	174
D.2.1.1. Intercambiadores tubulares	174
D.2.1.2. Intercambiadores de placas	176
D.2.2. Depósitos	177
D.2.3. Fabricantes de depositos para ACS	181

Índice de figuras

1.1. Incremento del consumo de energía	2
1.2. Incremento de las emisiones de GEI	2
1.3. Perspectivas en el consumo de energía y emisiones de GEI [2].	2
1.4. Distribución de la producción de energía y origen de producción [4].	3
1.5. Predicción de las reservas de petróleo [5].	3
1.6. Reservas probadas de petróleo por región [7].	4
1.7. Contexto energético en el mundo [8].	5
1.8. Comportamiento del consumo mundial de energía primaria [9].	6
1.9. Reservas de petróleo en México [7].	6
1.10. Contexto energético (México) [12].	7
1.11. Energía eléctrica por el sector público en México [13].	8
1.12. Capacidad instalada el mundo para el año 2007.	10
1.13. Distribución del potencial geotérmico en el año 2010 [18].	10
1.14. Energía geotérmica en uso en el año 2010 [18].	11
1.15. Zonas geotérmicas en investigación en México [11].	12
1.16. Localización de Araró en el estado de Michoacán [11].	13
1.17. Esquema del pozo Z-03 de Araró y perfil de temperaturas [19].	15
1.18. Propósito de la uso en cascada de la energía geotérmica en Eburru [22].	17
1.19. Uso de la energía geotérmica en cascada [23].	18
1.20. Improvisación del calor geotérmico [24].	19
1.21. Húsavík, diagrama del múltiple uso de la energía geotérmica [24].	19
2.1. Variación de las temperaturas de la tierra en función de la profundidad [16].	26
2.2. Esquema conceptual de un campo geotérmico [26].	26
2.3. Esquema generalizado de un yacimiento geotérmico [34].	28
2.4. Aplicaciones de la energía geotérmica de acuerdo con la temperatura [35].	29

2.5. Uso directo de calor (calefacción) y enfriamiento [37].	30
2.6. Ciclo binario [35].	30
2.7. Producción de electricidad mediante vapor geotérmico [35].	31
2.8. Spa situado en Erding (Alemania) [15].	32
2.9. Esquema del suministro de ACS a edificios mediante energía geotérmica [15].	33
2.10. Diversas formas de empleo de calor en invernaderos [15].	35
2.11. Disipación de calor en invernaderos [15].	36
2.12. Criadero piscícola climatizado con energía geotérmica [15].	37
2.13. Complejo industrial de Kawerau, Bahía de Plenty. Nueva Zelanda [15]. . . .	39
2.14. Esquema de un ciclo directo sin condensación [35].	40
2.15. Esquema de un ciclo directo con condensación [36].	40
2.16. Esquema de una planta simple-flash [38].	41
2.17. Esquema de una planta doble-flash [38].	42
2.18. Esquema de un ciclo binario [38].	43
2.19. Esquema de un ciclo Rankine orgánico [40].	44
2.20. Esquema de un ciclo Kalina [40].	46
2.21. Utilización en cascada de la energía geotérmica [16].	47
2.22. Esquema conceptual de un sistema multiproducto [1].	48
2.23. Configuración general de un sistema de trigeneración [43].	48
2.24. Diagrama simple de la máquina de absorción [1].	50
3.1. Esquema conceptual del sistema multiproducto.	52
3.2. Esquema simplificado del sistema multiproducto.	53
3.3. Planta ORMAT de 300 kW instalada en el campo geotérmico de Simirao Mi- choacán.	54
3.4. Esquema simplificado de la unidad de potencia.	55
3.5. Esquema simplificado de la unidad enfriadora.	56
3.6. Máquina de absorción Colibrí bv, modelo ARP [44].	56
3.7. Elección de la cámara de enfriamiento.	58
3.8. Materiales que conforman los muros de la cámara de enfriamiento.	58
3.9. Materiales que conforman el piso de la cámara de enfriamiento.	59
3.10. Materiales que conforman el techo de la cámara de enfriamiento.	59
3.11. Aprovechamiento de la energía geotérmica en el invernadero.	60
3.12. Calefacción en invernaderos mediante suelo radiante [46].	60
3.13. Invernadero tipo batiscénital [47].	61

3.14. Dimensiones de algunos conjuntos de invernaderos [48].	62
3.15. Esquema de la producción de ACS.	63
3.16. Perfil típico de consumo agua caliente de una vivienda [50].	63
3.17. Diseño básico del sistema multiproducto.	64
3.18. Diagrama del sistema en cascada desglosado.	65
3.19. Esquema del pozo, perfiles de temperaturas y presiones en función de la profundidad.	67
3.20. Variables del invernadero [53].	75
4.1. Analogía con un sistema de trigeneración.	89
4.2. Comparativa del sistema en cascada y la generación por separado de energía.	89
5.1. Comportamiento del sistema en la generación de electricidad y frío.	98
5.2. Comportamiento de la energía térmica cedida por el sistema.	98
5.3. Variaciones de las áreas de transferencia de calor del ORC.	100
5.4. Eficiencia del ciclo y flujo de isopentano.	100
5.5. Energía térmica absorbida y desechada por el ciclo.	101
5.6. Producción y consumo de potencia del ORC.	101
5.7. Variación de la producción de potencia en función del flujo del fluido geotérmico.	103
5.8. Variación del COP respecto de (a) la temperatura y (b) la presión del generador.	104
5.9. Variación del COP respecto de (a) la presión y (b) la temperatura del absorbedor.	105
5.10. Variación del COP respecto de la temperatura del evaporador.	106
5.11. Dimensiones del invernadero batimental.	107
5.12. Temperatura interior del invernadero con calefacción.	108
5.13. Distribución de temperaturas de un invernadero (Tomada de [66])	109
5.14. Temperatura del invernadero sin calefacción en un día típico de primavera.	110
5.15. Temperatura del invernadero con calefacción en un día típico de primavera.	110
5.16. Temperatura del invernadero sin calefacción en un día típico de verano.	111
5.17. Temperatura del invernadero con calefacción en un día típico de verano.	112
5.18. Temperatura del invernadero sin calefacción en un día típico de otoño.	112
5.19. Temperatura del invernadero con calefacción en un día típico de otoño.	113
5.20. Temperatura del invernadero sin calefacción en un día típico de invierno.	113
5.21. Temperatura del invernadero con calefacción en un día típico de invierno.	114
5.22. Distribución del consumo de agua durante el día.	115
5.23. Comportamiento de la temperatura del tanque respecto del tiempo.	115

5.24. Ventajas del sistema frente a la producción por separado.	122
B.1. Esquema simplificado de una máquina de absorción de simple efecto [66]. . .	140
B.2. Esquema simplificado de una máquina de absorción de doble efecto [66]. . .	141
B.3. Proceso de fabricación del hielo.	145
C.1. Arreglos de tuberías en serpentín simple y doble.	148
C.2. Arreglo de un invernadero con tuberías enterradas [71].	149
C.3. Vista esquemática del invernadero [72].	150
C.4. Vista esquemática del posicionamiento de los ductos de calefacción. 312 . . .	151
C.5. Esquema de invernadero con calefacción de tuberías e intercambiador de calor. 152	152
C.6. Esquema de un aerotermo Tecnatherm [74].	152
C.7. Calefacción de invernaderos mediante calentadores de aire por combustión [75]. 154	154
C.8. Calentador de aire munters [76].	154
C.9. Invernadero vertitúnel.	158
C.10. Invernadero batitúnel.	159
C.11. Invernadero baticenital.	160
C.12. Invernadero batisierra.	160
C.13. Invernadero megavent.	161
C.14. Invernadero Star Grow.	162
C.15. Invernadero casa sombra.	162
C.16. Aspecto de la producción de tomate bajo invernadero.	164
C.17. Distribución aproximada de precios en la producción de tomate.	168
D.1. Producción instantánea de ACS. Regulación en primario con válvula diversora. 172	172
D.2. Producción con interacumulador. Regulaciones en primario y secundario. . .	173
D.3. Esquema básico de un intercambiador de calor.	174
D.4. Tipos de flujos en intercambiadores de calor.	175
D.5. Conexiones necesarias en acumuladores e interacumuladores.	178
D.6. Interacumuladores de serpentín y doble pared.	179
D.7. Funcionamiento de un iteracumulador.	180

Índice de tablas

1.1. Principales estimaciones del potencial geotérmico de México.	11
1.2. Antecedentes históricos de energía geotérmica [21].	16
2.1. Rendimientos y producciones en invernaderos y con sistemas naturales [15]. .	35
2.2. Fluidos orgánicos e inorgánicos para ciclo ORC.	45
3.1. Características de la máquina de absorción $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$	57
3.2. Tipos de materiales y espesores de la cámara.	59
4.1. Datos para el modelo económico del ORC.	84
4.2. Costo de inversión ORC.	85
4.3. Propiedades típicas de combustibles para el cálculo de emisiones de CO_2 . . .	91
4.4. Valores típicos de las emisiones por unidad de energía eléctrica de algunas tecnologías.	91
5.1. Generación de electricidad, calor y frío	97
5.2. Flujos energéticos y parámetros de diseño ORC.	99
5.3. Variación de los flujos energéticos y parámetros del ORC.	100
5.4. Variación de la producción de potencia del ORC en tres escenarios.	102
5.5. Coeficiente de operación en función de (a) la temperatura y (b) la presión del generador.	104
5.6. Variación del coeficiente de operación en función de (a) la presión y (b) la temperatura del absorbedor.	105
5.7. Variación del COP respecto de la temperatura del evaporador.	106
5.8. Variables que generan un mayor COP.	106
5.9. Pérdidas de energía en el invernadero.	107
5.10. Flujos exergéticos del sistema en cascada.	116
5.11. Destrucciones de exergía en el sistema.	117

5.12. Flujos exergéticos para el ORC.	117
5.13. Destrucciones de exergía de los componentes del ORC.	118
5.14. Flujos exergéticos de la máquina de refrigeración por absorción.	119
5.15. Destrucciones de exergías en el ciclo de refrigeración por absorción.	119
5.16. Costos de inversión.	120
5.17. Precio asignado a los productos.	120
5.18. Beneficios por venta de productos.	121
5.19. Valoración de los indicadores económicos para el sistema en cascada.	121
5.20. Condiciones reales y teóricas de operación del sistema.	123
5.21. Resultados del análisis exergético convencional, en condiciones reales.	123
5.22. Análisis exergético convencional con condiciones teóricas.	123
5.23. Exergías evitables e inevitables.	124
5.24. Eficiencias exergéticas y tasa de destrucción de exergía.	124
A.1. Lista de fabricantes de plantas ORC.	136
A.2. Fabricantes de ciclos Kalina.	137
B.1. Fabricantes de máquinas de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$	141
B.2. Fabricantes de máquinas de absorción $\text{BrLi-H}_2\text{O}$	142
B.3. Propiedades del hielo y del agua	142
C.1. Características de diseño del aerotermo Tecnatherm [74].	153
C.2. Características, cultivos y precios para diferentes tipos de invernaderos.	163
C.3. Fabricantes de invernaderos.	164
D.1. Fabricantes de tanques ACS.	181

Nomenclatura

ACS	Agua Caliente Sanitaria
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CHCP	Combined Heat, Cold and Power
CHP	Combined Heat and Power
COP	Coefficient Of Performance
ENE	Estrategia Nacional de Energía
FESR	Fuel Energy Saving Ratio
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IAEP	Índice de Ahorro de Energía Primaria
ORC	Organic Rankine Cycle
PES	Primary Energy Savings
PRS	Periodo de Retorno Simple
TAT	Tecnología Activada Térmicamente
TC	Tipo de Cambio
TOP	Tiempo de Operación
USD	United States Dollar
VAN	Valor Actual Neto

Símbolos

A	Área, m^2	r	Déficit evaporación presión vapor, m^2/g
B	Exergía total, kW	$s_{1,..3}$	Presión vapor de agua saturada, $kPa/^\circ C^3$, $kPa/^\circ C^2$, $kPa/^\circ C$
b	Exergía de flujo, kJ/kg	T	Temperatura, K , $^\circ C$
C	Calor específico, kJ/kgK	v	Volumen específico, m^3/kg
C_g	Capacidad de calor del aire en el invernadero, $J/^\circ C m^2$	v	Velocidad, m/s
C_p	Calor específico a presión constante, kJ/kgK	V_i	Volumen interior, m^3
E	Electricidad, kW	$\dot{W}$	Potencia mecánica/eléctrica, kW
Ex	Exergía, kW	W_l	Peso seco follaje, g/m^2
F	Potencia frigorífica, kW	x	Distancia, m
F	Energía primaria, kW	x	Fracción masa, —
F_{CA}	Factor de cambios de aire, —	y	Tasa de destrucción de exergía, %
G	Gasto, m^3/s	Z	Radiación solar efectiva, —
$g_{1,..4}$	Conductancias del follaje, mm/s	Z	Costo de inversión, USD
g_b	Conductancia límite de frontera, mm/s		
h	Entalpia específica, kJ/kg		
$h_{i,o}$	Coeficiente convectivo, W/m^2K		
I	Ingreso económico, USD		
i	Tasa de interés, %		
K, U	Coeficiente de transferencia de calor, W/m^2K		
K_s	Transferencia de calor con el suelo, $W/^\circ C m^2$		
K_v	Transferencia de calor con el techo, $W/^\circ C m^2$		
$\dot{m}$	Flujo másico, kg/s		
n	Cambios de aire, —		
P	Presión, kPa		
$\dot{Q}$	Energía térmica, kW		
q	Radiación evaporación, m^2/g		

Simbolos griegos

α	Transferencia de calor tubería	p	Producto
Δ	Diferencia	$prom$	Promedio
ε	Efectividad, factor de emisiones, eficiencia exergética	$RACS$	Requiere Agua Caliente Sanitaria
η	Factor de conversión de radiación, eficiencia	T	Tanque, total
λ	Cambio de energía por vaporización	VE	Venta de electricidad
Λ	Constante de presión	Superindices	
ρ	Densidad	AV	Evitable
ψ	Eficiencia exergética	EN	Endógena
ω	Razón de humedad	EX	Exógena

Subindices

$1, ..n$	Referente a un estado
AB	Absorción
an	Anualizado
B	Bomba
CAS	Cascada
CON	Condensador, conductividad
$d, dest$	Destruída
e	Eléctrica
EVP	Evaporador
f	Flujo, fuel
g	Aire
GEN	Generador
I	Interés
INV	Invernaderos
Inv	Inversión
k	Componente
n	Neto

 UN Inevitable

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Situación energética actual

Está previsto que el consumo de energía en el mundo se incremente en un 50 % para el año 2030. Las economías emergentes serán, con mucho, las responsables del crecimiento proyectado en el consumo de energía. Las tendencias indican que el incremento del consumo de energía regional por sector está íntimamente ligado a su crecimiento económico. A nivel mundial, los sectores industrial y de transporte son los que experimentarán un crecimiento más rápido, del 2.1 % por año, en ambos sectores. Se producirán crecimientos más lentos en el ámbito residencial y comercial, con un promedio anual de 1.5 y 1.9 % hasta el año 2025. Colateralmente, las diversas actividades humanas y el uso de procesos ineficientes de transformación de energía han incrementado la producción de gases nocivos, que al concentrarse en la atmósfera provocan el llamado “efecto invernadero”, por lo que se genera un mayor consumo de energía y un aumento en los precios de la energía. Las emisiones de dióxido de carbono (el mayor causante del efecto invernadero), provienen principalmente de la combustión de combustibles fósiles para la producción de energía, siendo el centro del debate del cambio climático. Se prevé que las emisiones de CO₂ aumenten a 33,900 en 2015 y 42,900 en 2030 [1]. La Figura 1.3, muestra el incremento del consumo de energía y el incremento de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Con la industrialización y la globalización, la demanda de energía ha aumentado de manera exponencial. Los combustibles fósiles en forma de carbón, petróleo y gas natural comprenden 80 % del consumo mundial de energía [3]. La Figura 1.3 (a), muestra una predicción del consumo de energía de acuerdo al tipo de región o economía, pero no muestra la proyección del consumo de energía atendiendo el origen de producción de la misma. La Figura 1.4,

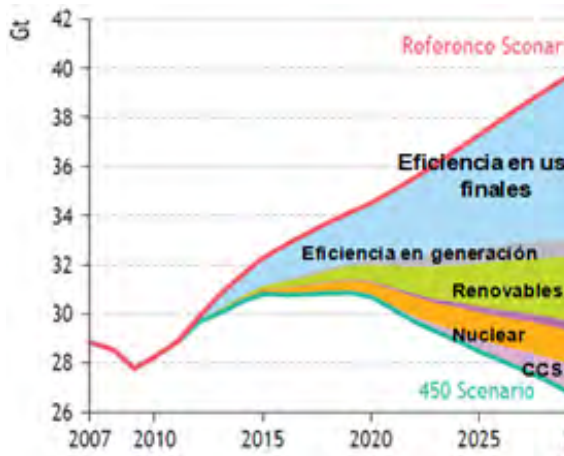


Figura 1.1: Incremento del consumo de energía

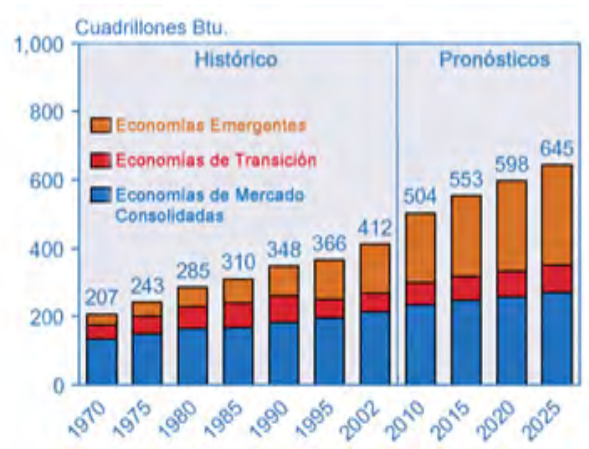


Figura 1.2: Incremento de las emisiones de GEI

Figura 1.3: Perspectivas en el consumo de energía y emisiones de GEI [2].

muestra ésta proyección.

La energía es esencial para el funcionamiento de todas las actividades ya sea una nación desarrollada o en desarrollo. Se estima que el uso industrial de energía en los países en desarrollo es de alrededor de 45 - 50 % del consumo total de energía comercial [3]. En la actualidad no se puede concebir una sociedad desarrollada que no utilice gran cantidad de energía, se está tan acostumbrado a disponer de ella que siempre que se necesita, es cuando realmente se valora.

Como se aprecia en la Figura 1.4, la predicción de la producción de energía se basa en la utilización de combustibles fósiles (productos derivados de petróleo). Sin embargo, las reservas de petróleo a escala mundial bastarán para satisfacer la demanda proyectada para las tres próximas décadas, es decir, la posible disminución de reservas convencionales de petróleo constituirán un motivo de preocupación a partir de 2030 [5]. A demás estas reservas se concentran en unas áreas geográficas determinadas. Esto ocasiona una gran dependencia energética y por consiguiente económica de países cuya situación social y política suele ser en muchos casos inestable, provocando grandes subidas repentinas de los precios que a su vez producen grandes impactos en la economía mundial [6]. La Figura 1.5, muestra la evolución del uso de las energías y el pronóstico de las reservas de petróleo en las próximas décadas.

La extracción de crudo ha rebasado las reservas probadas y los descubrimientos futuros. La Figura 1.5, muestra el pronóstico de las reservas de petróleo a nivel mundial. Sin embargo, no muestra las reservas del recurso no renovable (petróleo) por región. La Figura 1.6, muestra

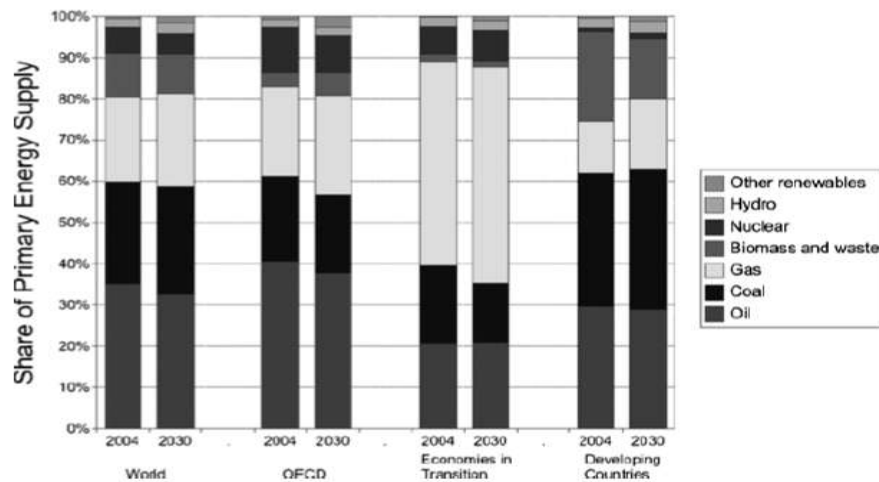


Figura 1.4: Distribución de la producción de energía y origen de producción [4].



Figura 1.5: Predicción de las reservas de petróleo [5].



Figura 1.6: Reservas probadas de petróleo por región [7].

estas reservas probadas a nivel mundial y por regiones en los continentes.

La crisis del petróleo ha impulsado el comienzo de la utilización de fuentes de energía alternativas y la concienciación sobre el agotamiento de las fuentes de energía convencionales [6]. Paralelamente se trata de aumentar la eficiencia de los procesos de transformación de la energía y la moderación de los consumos.

1.1.1. Contexto mundial

La energía es vital para el desarrollo de cualquier país ya sea social, económica o el medio ambiente y está ligada a la producción industrial, la producción agrícola, la salud, el acceso al agua, la población, la educación, la calidad de vida, etc [3].

Actualmente, en la matriz energética mundial los combustibles fósiles ocupan la mayor parte de la generación de energía, continuándole la energía hidroeléctrica y energía nuclear, después se encuentran las energías limpias con un menor porcentaje. La Figura 1.7, muestra el contexto energético en el mundo atendiendo el tipo de central en la que se produce.

La Figura 1.7, muestra un esquema reciente del contexto energético a nivel mundial. Sin embargo, no muestra cómo ha evolucionado el uso de las tecnologías y consumo de combus-

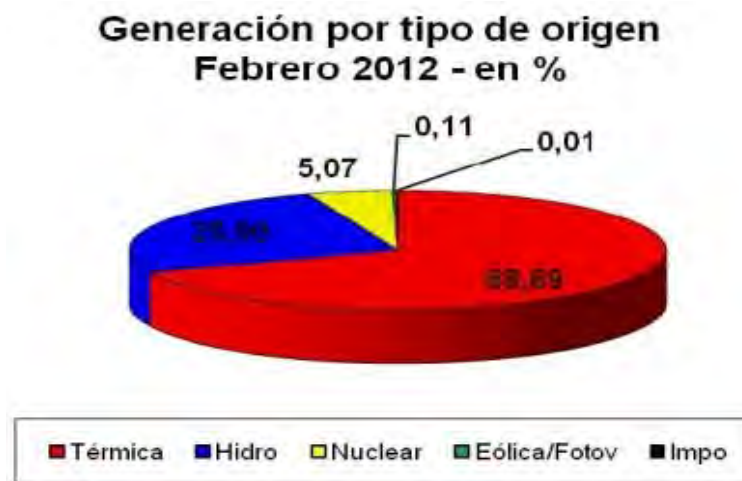


Figura 1.7: Contexto energético en el mundo [8].

tibles utilizados para la producción de energía. La Figura 1.8, muestra el comportamiento y uso de los diferentes combustibles para la producción de energía primaria en el periodo del año 2003 a 2008.

A pesar de la gran producción de energía, hoy en día, hay 1.4 millones de personas de todo el mundo que no tienen acceso a la electricidad. Esta cifra representa cerca del 15 % de la población del mundo, siendo el 85 % de ellos habitantes de zonas rurales [4].

1.1.2. Situación en México

Según la Secretaría de Energía en lo que va del periodo 1990 a 2006 la producción nacional de energía creció 29.1 %. La mayor producción se realizó en la línea de los hidrocarburos, lo cual representa la principal fuente de producción de energía primaria. En términos de estructura, la participación más alta la representa la producción de crudo y le sigue el gas natural, ver Figura 1.9.

En éste periodo, la energía primaria destinada directamente al consumo final creció 42.8 %. En orden de importancia, el mayor crecimiento en el consumo final de energía primaria se presentó en el sector transporte (56.1 %), le siguió el sector agropecuario (38.5 %), el sector residencial (20.2 %), y finalmente el sector industrial (15.7 %), en el cual, los consumos de energía se ven afectados por la baja actividad productiva, y el incremento en los precios de los combustibles [10].

Colateralmente, la Estrategia Nacional de Energía (ENE) es el marco de referencia general para el sector energético en México y, como se sabe, define tres ejes rectores: Seguridad

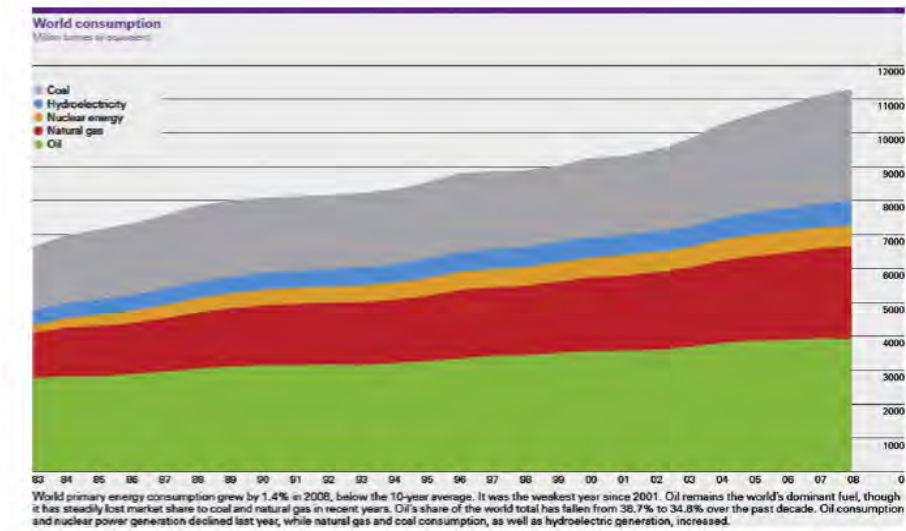


Figura 1.8: Comportamiento del consumo mundial de energía primaria [9].

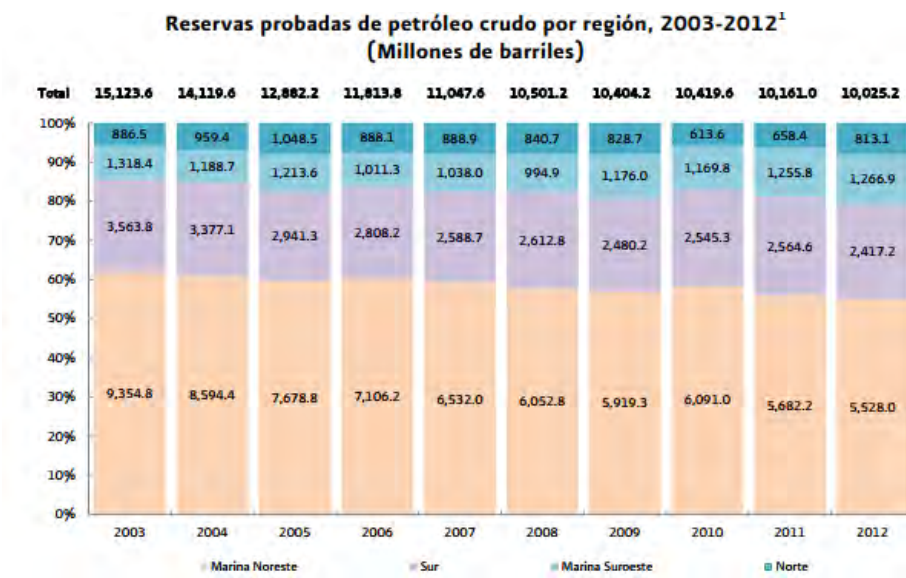


Figura 1.9: Reservas de petróleo en México [7].

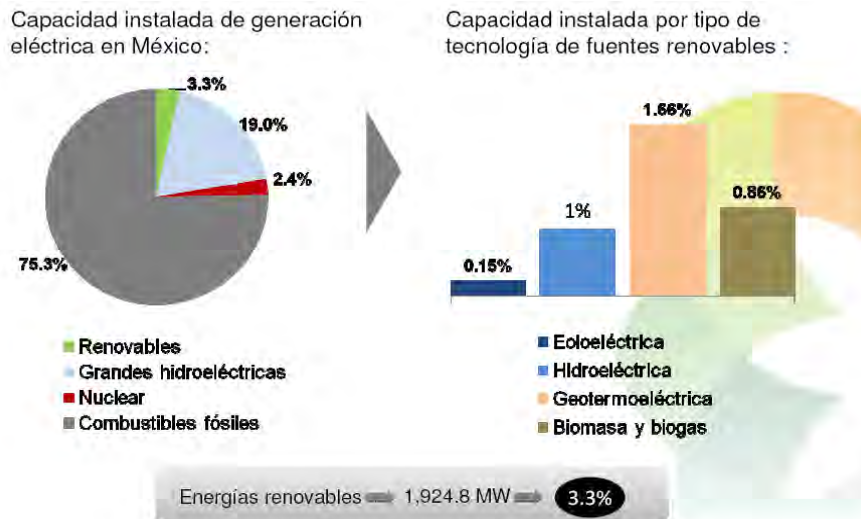


Figura 1.10: Contexto energético (México) [12].

Energética, Eficiencia Económica y Productiva, y Sustentabilidad Ambiental. A partir de ellos, en su versión más reciente se establecen ocho objetivos, el segundo de los cuales es: “Diversificar las fuentes de energía, incrementando la participación de energías limpias” [11].

A finales de 2008, la capacidad instalada de fuentes de energías renovables ascendió a casi 2,000 MW de potencia. Esto incluye energía eólica, hidroeléctrica de pequeña potencia (menor de 30 MW), geotermia, biomasa y biogás. La participación de las fuentes renovables en la matriz energética mexicana representó el 3.3 % del total [12]. Sin embargo, para fines de diciembre de 2010, las energías limpias (hidroeléctricas, nucleares, geotermia y viento) representaron el 26.4 % de la capacidad instalada para el servicio público de energía eléctrica [11]. La matriz energética en México para el año 2008, se puede apreciar en la Figura 1.10.

En la Figura 1.10, muestra la generación de energía en México por tipo de central y como se puede apreciar las energías representan un bajo porcentaje de la capacidad instalada, siendo la energía geotérmica la que mayor porcentaje ocupa dentro de las energías renovables.

Aunque en México predomina el uso de combustibles fósiles, las fuentes renovables de energía han ido incrementado su participación en la matriz energética mexicana, tal es el caso de la energía geotérmica. La Figura 1.11, muestra una evolución de la producción de energía eléctrica en México.

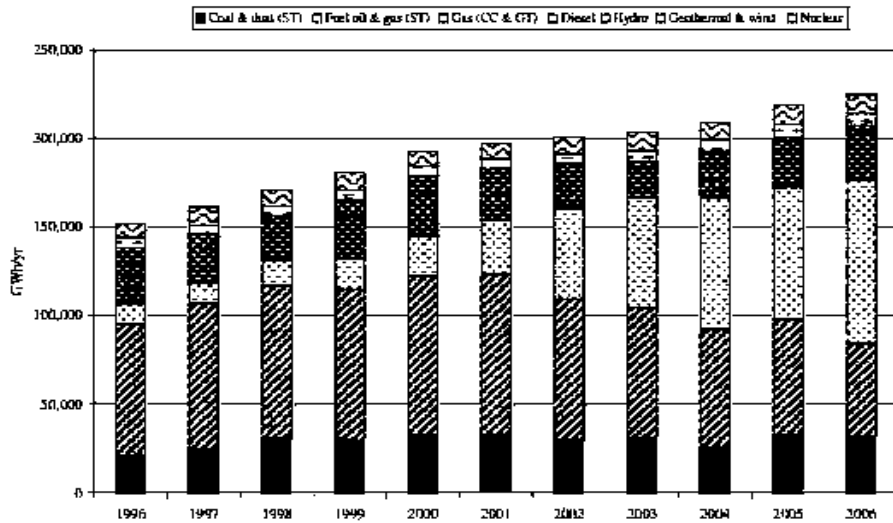


Figura 1.11: Energía eléctrica por el sector público en México [13].

1.2. Energía geotérmica y desarrollo sostenible

El modelo energético no es sostenible, en primer lugar por estar haciendo uso de recursos no renovables y por el impacto al medio ambiente que genera (lluvias ácidas, contaminación del aire, de las aguas por vertidos, mareas negras, residuos radiactivos, etc.). Las tasas de extracción no deben superar a las de regeneración (o, para el caso de recursos no renovables, de creación de sustitutos renovables), actualmente México está entrando en una era de economía en un mundo saturado, en la que el capital natural será cada vez más el factor limitativo. Es imperioso buscar alternativas viables que permitan mejorar las condiciones de vida sin afectación del medio ambiente y que estas alternativas en primer lugar puedan ser aplicadas conforme a los recursos y necesidades de cada región. Producir energía limpia es apostar por las renovables, es frenar en gran medida las importaciones energéticas, es limitar el efecto invernadero y es también generar nuevas fuentes de trabajo. Las energías renovables pueden solucionar muchos de los problemas ambientales y coadyuvar con las acciones para combatir el cambio climático [14].

La demanda de energía implica la utilización eficaz de los recursos energéticos, la fiabilidad en el suministro, la gestión eficiente de los recursos energéticos, el ahorro energético, producción combinada de calor y electricidad, sistemas de energías renovables, sistemas de energía integrados, sistemas de suministro de energía independientes [3].

Dentro del grupo de las energías renovables, la energía geotérmica es muchas veces ignorada. Sin embargo, ya existía antes de que la expresión fuese inventada y mucho antes de que

se hablara de desarrollo sostenible, de gases de efecto invernadero o de lucha contra el cambio climático. A pesar de su antigüedad, o tal vez a causa de ella, no se beneficia de todo el interés que merece. El calor terrestre es una fuente de energía duradera 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 de utilización. La energía geotérmica representa una respuesta local, ecológica y eficiente para reducir costes energéticos. La energía geotérmica se muestra como una de las energías más prometedoras y suscita un interés creciente en el conjunto de las estrategias que promueven la explotación de fuentes de energía versátiles y renovables [15].

1.2.1. Energía geotérmica en el mundo

El uso directo de la energía geotérmica es una de las técnicas más antiguas y versátiles de la utilización de la energía. Muchas regiones tienen recursos geotérmicos accesibles, especialmente aquellos países en el “Anillo de Fuego” alrededor del océano Pacífico, en zonas de expansión oceánica, en zonas de ruptura cortical y puntos calientes.

La geotermia es una fuente renovable de energía que se ha utilizado en el mundo para generar energía eléctrica desde 1904 [16]. La Figura 1.12, muestra la generación de energía en base a la energía geotérmica.

México se sitúa en cuarto lugar de producción de electricidad a partir de energía geotérmica, con una potencia total instalada de 953 MW a finales de 2007 [17].

En cuanto a los usos no eléctricos, la contribución de la geotermia de baja temperatura es más difícil de cuantificar por la gran diversidad de aplicaciones y por ser de menor entidad. El uso térmico más común en el mundo corresponde a bombas de calor, con un 47.2 % frente a la potencia total instalada, seguido de balnearios, sistemas de calefacción, invernaderos, acuicultura y procesos industriales [16].

En la Figura 1.13, se muestra en porcentaje el total del potencial geotérmico a nivel mundial para el año 2010.

Ahora bien, no todo el potencial geotérmico que se muestra en la Figura 1.13, es utilizado. La Figura 1.14, muestra en porcentaje la energía geotérmica en uso.

Como se puede apreciar existe un gran potencial de energía geotérmica que aún no se utiliza o que se encuentra en etapa de exploración.

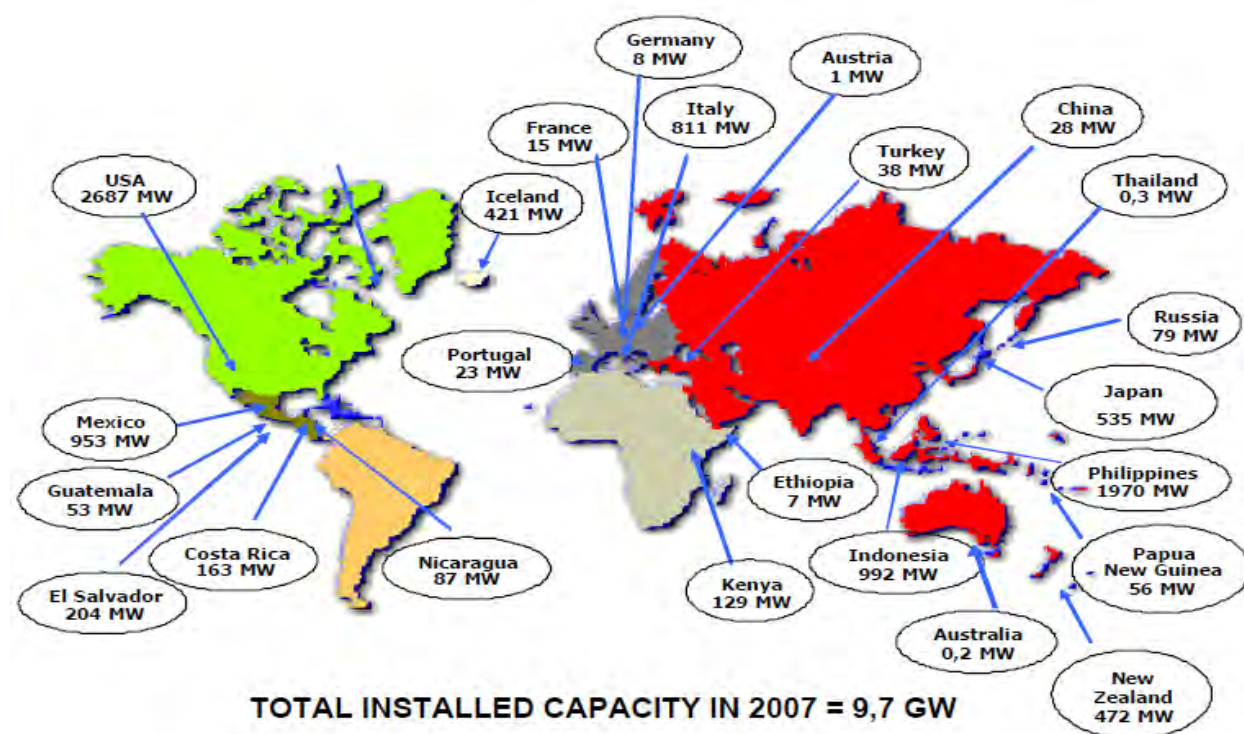


Figura 1.12: Capacidad instalada el mundo para el año 2007.

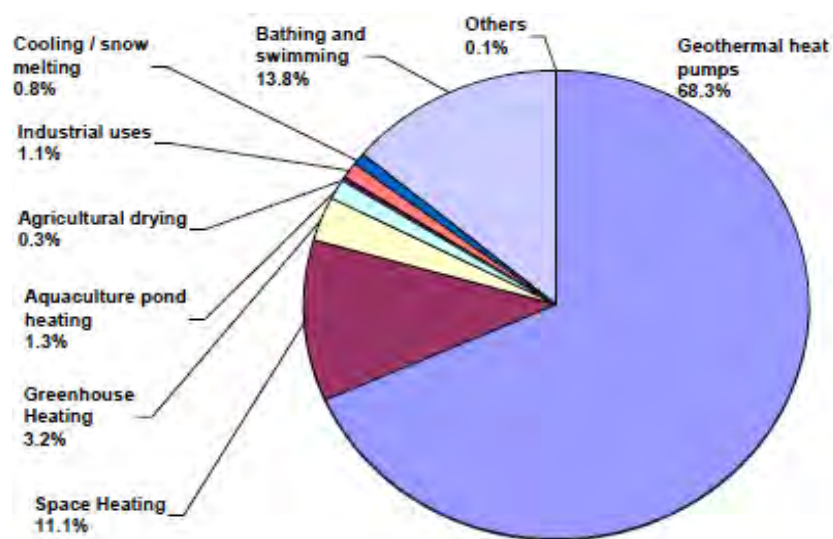


Figura 1.13: Distribución del potencial geotérmico en el año 2010 [18].

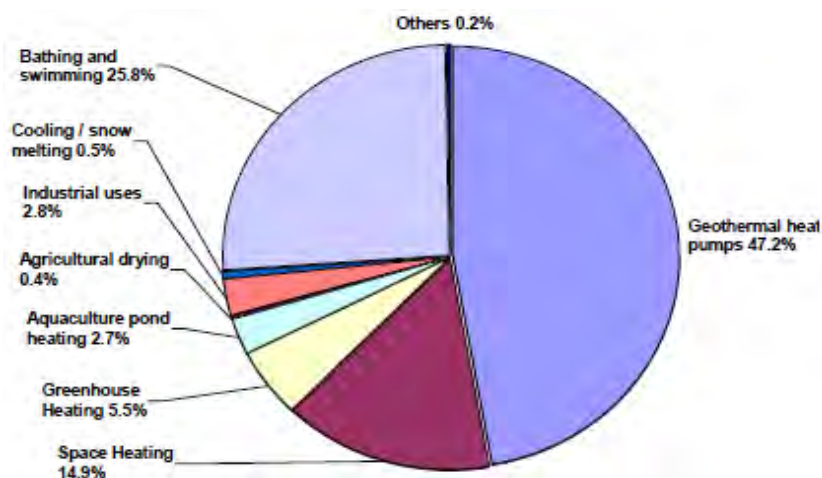


Figura 1.14: Energía geotérmica en uso en el año 2010 [18].

Tabla 1.1: Principales estimaciones del potencial geotérmico de México.

Año	Capacidad Instalada en MW
1975	75
1985	170
2009	958
2011	958

1.2.2. Energía geotérmica en México

México es de los principales países que explotan la energía geotérmica. En el país comenzó a operar la primera unidad geotermoeléctrica en 1959, con 3.5 MW de capacidad, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, actualmente fuera de operación. Puesto que el país cuenta con amplia experiencia en la generación geotermoeléctrica y, a través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), opera actualmente 38 unidades con una capacidad instalada total de 958 MW, es evidente que un mayor desarrollo de la geotermia puede incidir sustancialmente en la consecución de la meta mencionada [11]. La Tabla 1.1, muestra un historial de estimaciones del potencial geotérmico de México.

La Tabla 1.1, muestra la evolución de la capacidad instalada de energía geotérmica en México, sin embargo existen también estudios que revelan zonas de recurso geotérmicos hidrotermales que aún están en investigación. La Figura 1.15, muestra la localización de estas zonas en la República Mexicana.



Figura 1.15: Zonas geotérmicas en investigación en México [11].

1.3. Potencial geotérmico en el Estado de Michoacán

Michoacán es uno de los estados con grandes recursos geotérmicos de México, la zona geotérmica más conocida y con mayor capacidad instalada es la de los Azufres. Además de los Azufres existen otras zonas con potencial geotérmico como lo son Puruándiro, Ixtlán de los Hervores, los Negritos y Araró, esta última es la segunda zona con mayor capacidad de Michoacán (32 MW) [11].

Araró se ubica en la porción nororiental del Estado de Michoacán, a unos 40 kilómetros al noreste de Morelia, unos 30 kilómetros al noreste del campo geotérmico de Los Azufres, y al oriente del Lago de Cuitzeo. La Figura 1.16, muestra la localización de Araró en el estado de Michoacán.

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. Las fallas más relevantes, conocidas como Falla Huingo y Falla Araró-Simirao, presentan esa misma dirección y actúan como conductos para el movimiento de los fluidos hidrotermales, 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

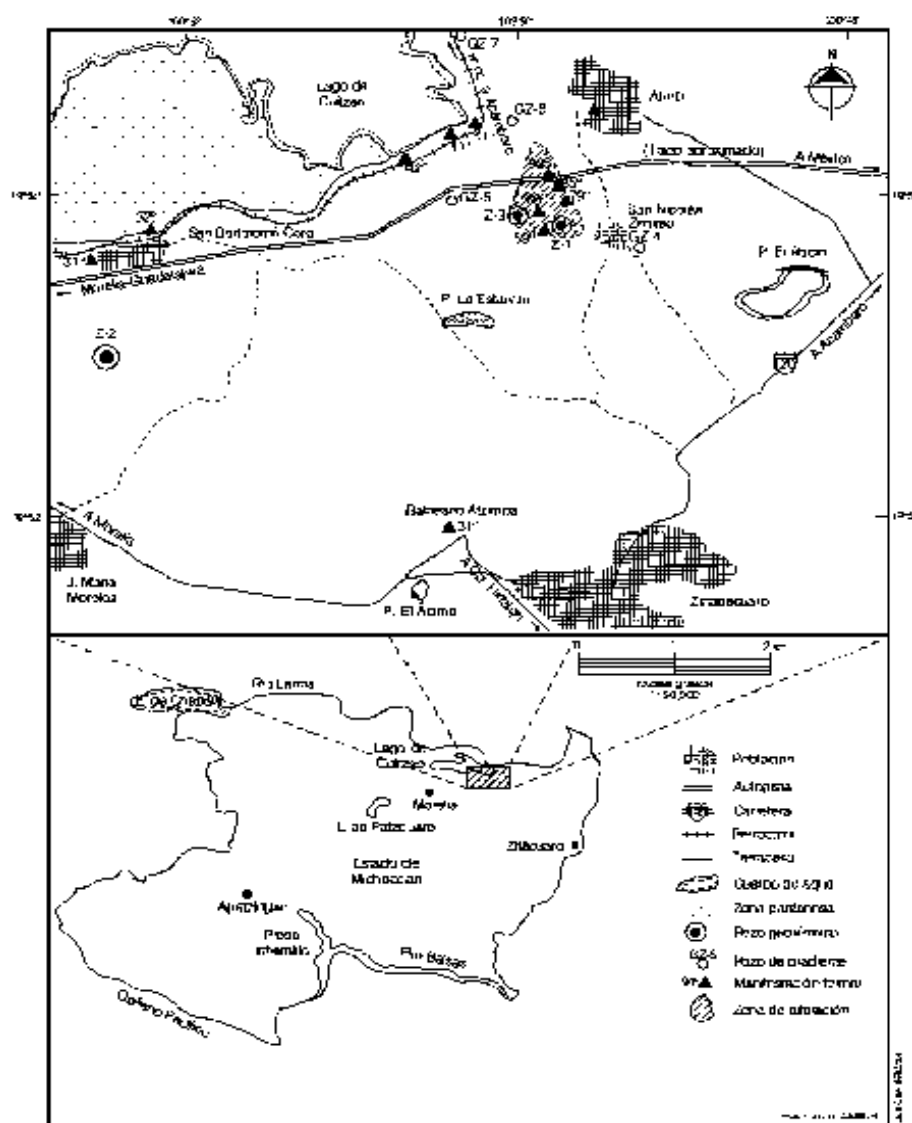


Figura 1.16: Localización de Araró en el estado de Michoacán [11].

conocida como San Nicolás Simirao (48 - 99 °C en una superficie de 10 hectáreas). Las aguas de los manantiales en esta área son de tipo clorurado sódico con concentraciones promedio de boro de 55 ppm. El geotermómetro de potasio-sodio indica temperaturas promedio de fondo de 205 °C y máximas de 228 °C.

En la zona, la CFE ha realizado estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos de detalle, tanto en la zona de mayor interés como en otras zonas cercanas a la misma. Los estudios se han llevado a cabo en dos etapas, una en la década de los setenta y otra en la de los ochenta. Como conclusión de la primera etapa se perforó un pozo exploratorio en 1981, fuera de la zona de mayor interés, y como terminación de la segunda otro pozo, denominado Z-3 y perforado en 1991 a 1344 metros de profundidad. En este último pozo se registraron 101 °C de temperatura al fondo, con un máximo de 135 °C a 550 metros de profundidad. La mineralogía hidrotermal revela temperaturas que en el pasado debieron estar entre 250 y 300 °C, mientras que los estudios de inclusiones fluidas indican paleo temperaturas entre 218 y 247 °C [11]. La Figura 1.17, muestra un esquema del pozo y su perfil de temperaturas.

1.4. Antecedentes

1.4.1. Breve historia

Para tener una breve descripción sobre los antecedentes de la utilización de la energía geotérmica en sistemas multiproducto, primeramente se describirá brevemente los sistemas de poligeneración y posteriormente la utilización de la energía geotérmica.

En lo que confiere a sistemas multiproducto, primeramente apareció la cogeneración, ésta tiene sus orígenes en la Revolución Industrial en Europa y los inicios del siglo XX en los Estados Unidos, particularmente en las industrias, textil y del papel en este país [20].

Posterior a la cogeneración, nace la trigeneración que es un sistema de cogeneración más un sistema de refrigeración por absorción. El ciclo de refrigeración por absorción fue descubierto por Nairn en 1777 y la primera máquina de refrigeración se patentó en 1834 por Jacob Perkins. Por su parte, el concepto de trigeneración se introdujo a principios de los años ochenta y comúnmente se utilizaba en esquemas de calentamiento y enfriamiento de distrito, posteriormente se comenzó a utilizar cada vez principalmente en industrias químicas y petroquímicas debido a la frecuente necesidad de electricidad calor y frío en las plantas de proceso. Finalmente después del año 2000 se comienzan a introducir el concepto de los sistemas multiproducto [1]. En lo que respecta a la energía geotérmica, los restos arqueológicos más antiguos relacionados con la energía geotérmica han sido encontrados en Niisato, en

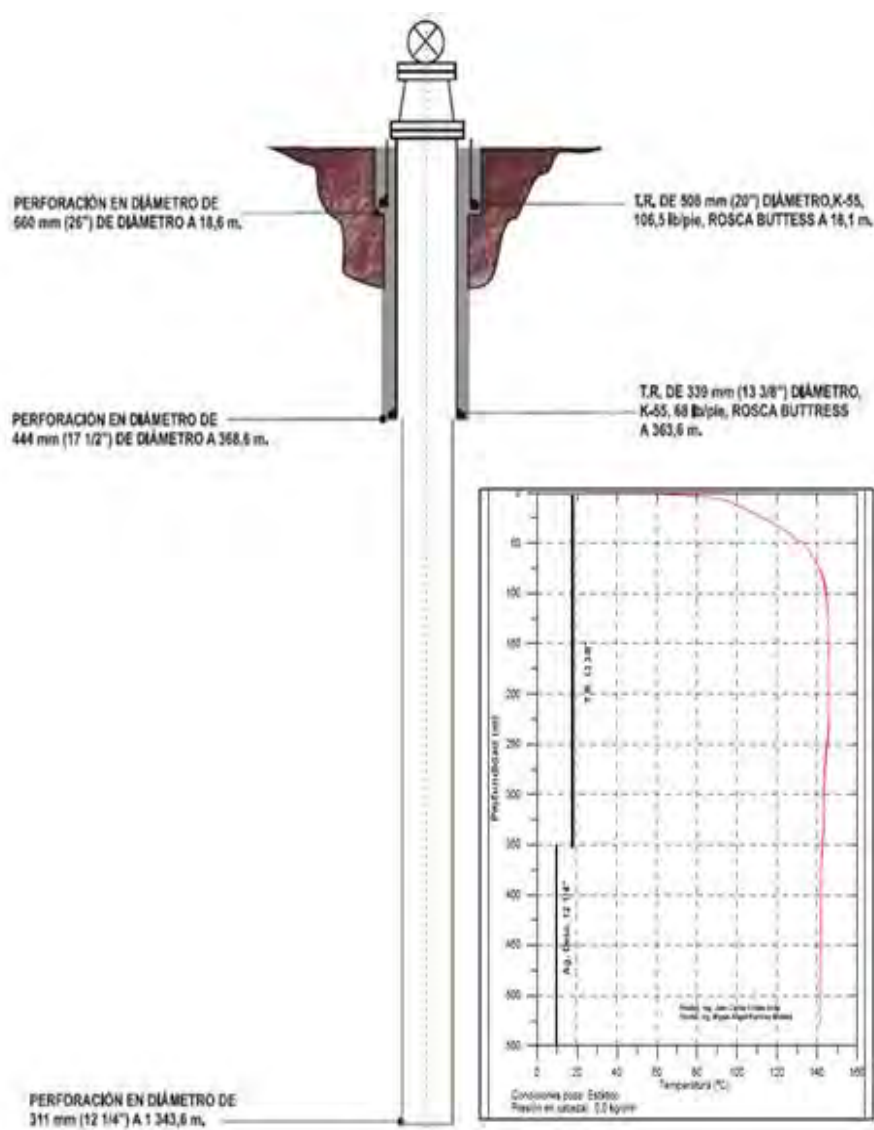


Figura 1.17: Esquema del pozo Z-03 de Araró y perfil de temperaturas [19].

Tabla 1.2: Antecedentes históricos de energía geotérmica [21].

Año	Descripción
3500 a.c.	Uso de minerales como medicina, calefacción urbana y baños termales; griegos y romanos.
1330	Distribución de agua caliente y cuota por el servicio; Francia.
1818	Utilización industrial de recursos geotérmicos (sales de boro); Larderello, Toscana, Italia.
1833	Pozo artesano de 548 m de profundidad, que captó agua a 30 °C; Paris, Francia.
1892	Primera red local de calefacción urbana; Idaho, Estados Unidos.
1904	Primera instalación de generación de energía eléctrica de origen geotérmico en Larderello (Italia).
1913	Generación de electricidad (250 W) en una central a partir de vapor geotérmico.
1919	Instalación de plantas experimentales de 1 kW para producir energía eléctrica; Beppu, Japón.
1930	Primera red moderna de calefacción.
1945	Instalación con una bomba de calor geotérmica; Indianápolis, Estados Unidos.
70's	Investigación de recursos geotérmicos (generación eléctrica o calefacción y agua caliente).
90's	Desarrollo prometedor a nivel internacional a consecuencia de reducir emisiones de CO ₂ a la atmosfera.
2000	Capacidad geotermoeléctrica a nivel mundial de 8,000 MW.

Japón, y son objetos tallados en piedra volcánica que datan de la Tercera Glaciación, hace entre 15,000 y 20,000 años. La Tabla 1.2, muestra a manera de resumen los antecedentes históricos acerca de la energía geotérmica [21].

1.4.2. Estado del arte

Existen algunos estudios realizados durante la última década del uso en cascada de la energía geotérmica en sistemas multiproducto. A continuación, se muestra una descripción breve de las investigaciones más recientes:

En el año 2012, se realizó un estudio sobre el uso de la energía geotérmica en cascada, caso de estudio Eburru [22]. Se propone que la energía de los dos pozos poco profundos en Eburru (Kenya) sea usada de una manera en cascada para el secado de productos agrícolas, la calefacción de invernaderos, purificación de miel, la incubación de aves de corral, en una instalación recreativa de sauna vapor y para la prestación de la tan necesaria agua potable.

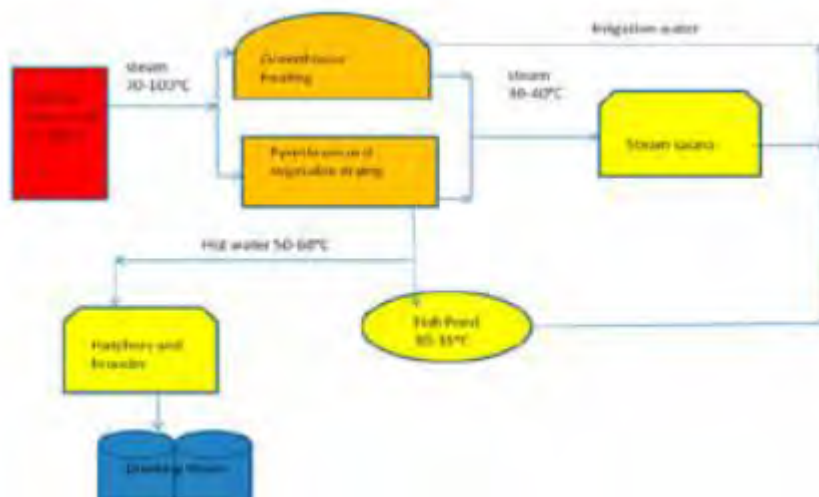


Figura 1.18: Propósito de la uso en cascada de la energía geotérmica en Eburru [22].

Se realiza una evaluación del potencial de la energía y química de los líquidos del vapor de los pozos y también se lleva a cabo la evaluación de la viabilidad técnica, así como establecer si hay una necesidad de perforar un pozo nuevo para este proyecto. El costo de la realización de este proyecto se ha estimado en alrededor de USD \$ 40,000. La Figura 1.18, muestra un esquema de este proyecto.

En Rumania se realizó otro estudio sobre el uso de la energía geotérmica en cascada. En este estudio se analiza el uso en cascada de la energía geotérmica de temperatura moderada en una planta de pasteurización de leche [23]. Se propone utilizar la energía geotérmica en un ciclo binario para la producción de electricidad, el proceso de la pasteurización de la leche, así como utilizar la energía en un conjunto de viviendas y balneología. La Figura 1.19, muestra el diagrama del uso de la energía geotérmica en cascada.

En Húsavík (Islandia), debido a su alto potencial geotérmico se comenzó con un pozo para la utilización en la calefacción y enfriamiento de distrito. Posteriormente se realizaron análisis de ajustes en el sistema para obtener varios productos, como electricidad [24]. En la Figura 1.20, se muestra el sistema con el que se comenzó y el nuevo sistema.

Posteriormente, se realizaron varios análisis para obtener varios productos de dicho recurso. La Figura 1.21, muestra los productos obtenidos.

Entre los ajustes se perforaron nuevos pozos y se realizó el análisis para observar la probabilidad de producir varios productos como son; electricidad, calefacción para casas, piscicultura, agua para bañarse en una laguna, invernaderos y energía térmica para una industria. La central (planta de potencia) opera bajo el llamado Kalina, técnica que se basa en un ciclo

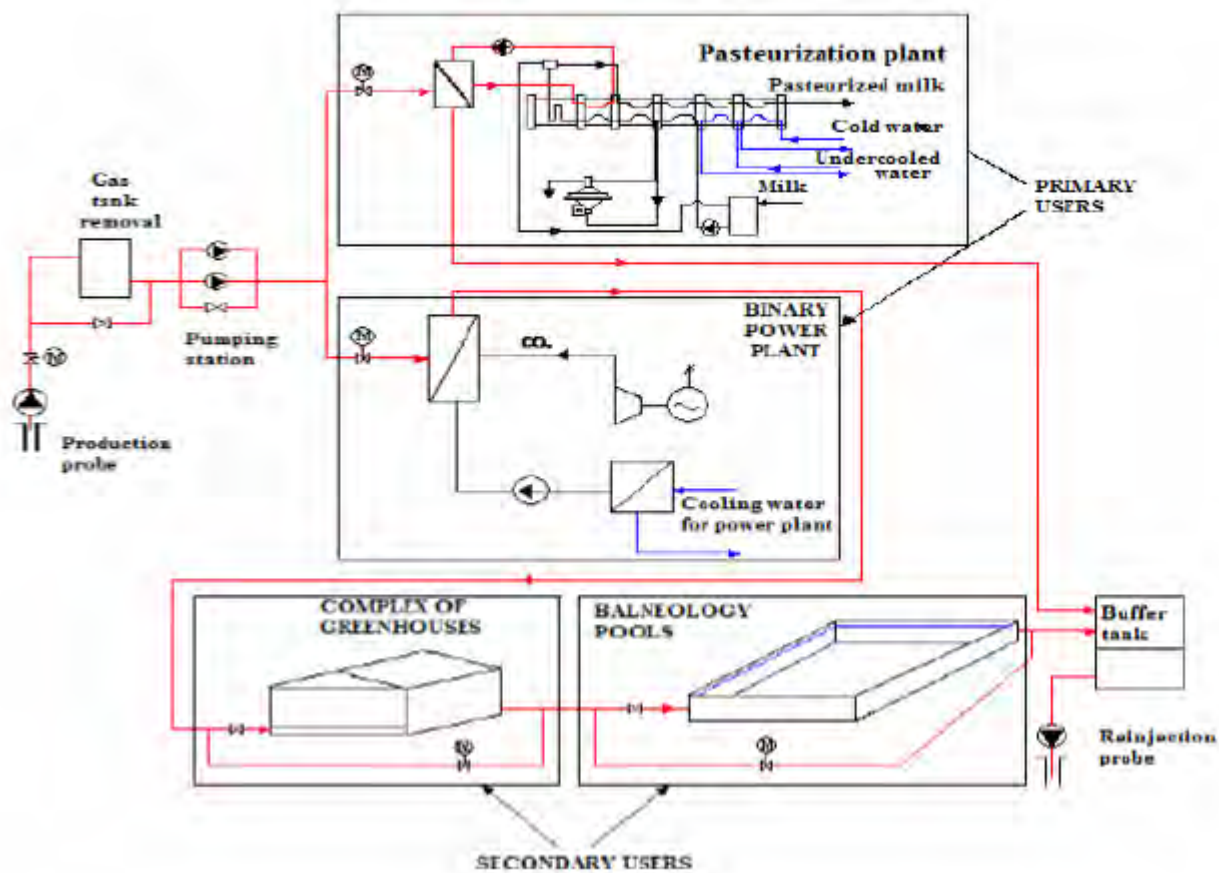


Figura 1.19: Uso de la energía geotérmica en cascada [23].

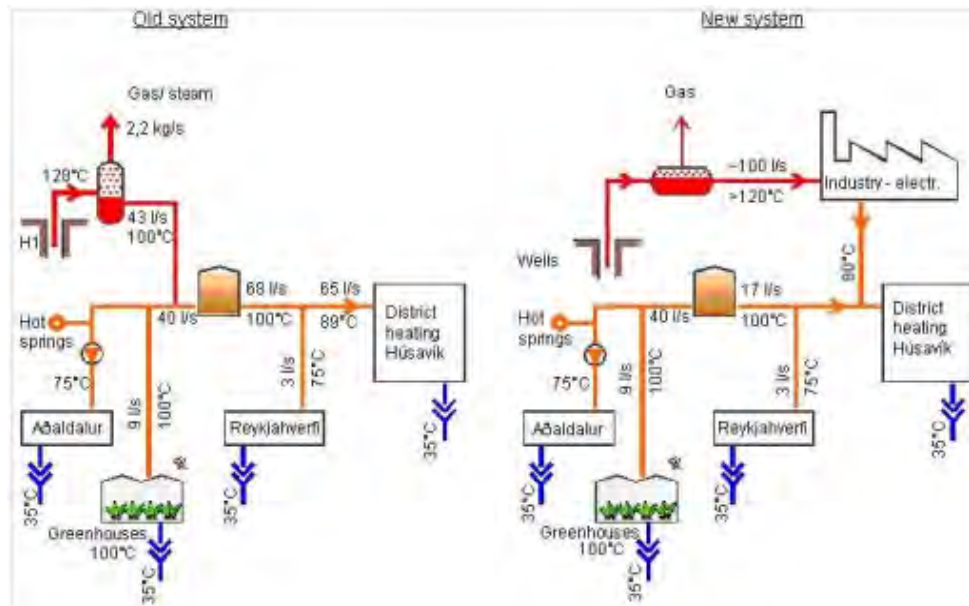


Figura 1.20: Improvisación del calor geotérmico [24].

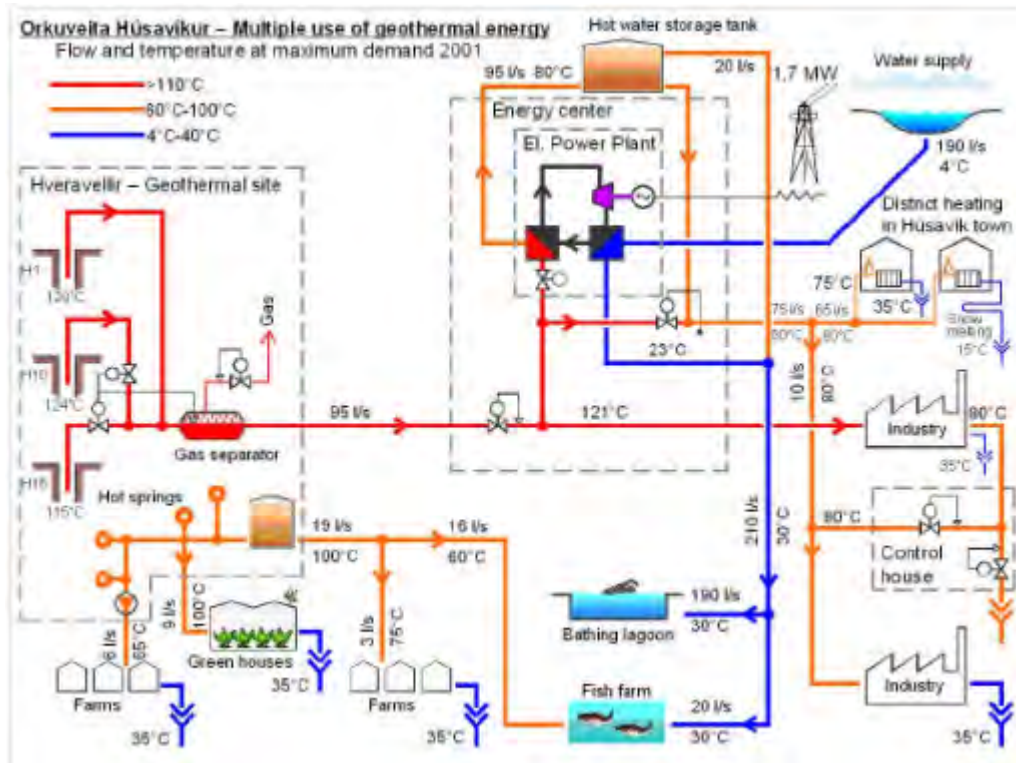


Figura 1.21: Húsavík, diagrama del múltiple uso de la energía geotérmica [24].

cerrado en el que un agua y la mezcla de amoníaco ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) sirven como la transferencia del medio (refrigerante). La prioridad del sistema es la producción de electricidad, calefacción urbana y el calor de la industria [24].

Los estudios anteriores son una breve descripción del uso en cascada de la energía geotérmica, sin embargo existe una gran cantidad de publicaciones que relacionan a la energía geotérmica en la producción de energía, situación actual y diferentes usos. A continuación se realiza una descripción de aspectos que engloban el uso de la energía geotérmica en cascada:

En el año 2011 en Grecia se presentó una revisión sobre aplicaciones de ORC, ciclos que son similares al ciclo convencional de vapor, pero usan fluidos orgánicos tales como refrigerantes e hidrocarburos además de agua. Este documento presenta aplicaciones existentes y analizan su madurez. En años recientes, la investigación se ha intensificado en este dispositivo ya que está siendo progresivamente adoptado como la tecnología principal para convertir fuentes de calor de baja temperatura en energía [25].

En España en el año 2011, se realizó un proyecto que consiste en un estudio de viabilidad técnico-económico de distintas centrales de ciclo binario. En el estudio se ubicó las centrales de estudio, donde se encuentren yacimientos de media temperatura, también se seleccionó el fluido de trabajo y la configuración adecuada para maximizar la potencia producida por la planta [26].

En el mismo año 2011, en China se desarrolló una investigación sobre los fluidos y la optimización de los parámetros de un sistema de cogeneración. El sistema es impulsado por fuentes geotérmicas de baja temperatura. Se propone un sistema de cogeneración y es investigado tecno-económicamente, el sistema consiste en una baja temperatura geotérmica con Ciclos Rankine Orgánicos que se interconectan con un intercambiador de calor. El objetivo principal es identificar el fluido de trabajo adecuado (fluidos con temperatura de ebullición que van desde -47.69 a 47.59 °C). Los criterios de selección (evaluados) incluyen potencia neta de salida, flujo y velocidad de masa de la fuente caliente, área de transferencia de calor y costos de producción de electricidad [27].

En Alemania en el año 2010 se publicó un estudio relacionado con ciclos Rankine orgánicos y la generación combinada de calor y electricidad [28]. En este estudio la opción de producción combinada de calor y generación de energía geotérmica se consideró para recursos a un nivel de temperatura por debajo de 450 K. se comparan circuitos en serie y en paralelo por análisis de la segunda ley. Se seleccionaron los parámetros para la selección del fluido de trabajo. Los resultados muestran que debido a una producción combinada de calor y electricidad, la eficiencia de segunda ley de una planta de energía geotérmica puede ser mucho más eficiente la generación de energía convencional.

También en el año 2009, en Alemania se realizó un estudio sobre las aplicaciones de los Ciclos Rankine Orgánicos, se presenta que estos ciclos ha demostrado ser la solución prometedora para la producción descentralizada de calor y energía combinada [29]. El proceso permite el uso de fuentes de calor de temperatura baja, ofreciendo una eficiencia ventajosa en aplicaciones a pequeña escala. Esta es la razón por la cual numerosas plantas de energía geotérmica o de biomasa basadas en esta tecnología se han incrementado en los últimos años. Las características favorables de los ORC los hacen adecuados para la recuperación de calor residual de las plantas de biogás o sistemas micro-cogeneración.

En Italia en el año 2009, se realizó un estudio sobre el diseño óptimo de centrales de ciclo binario de agua de media temperatura [30]. En este estudio se analiza y se discute una metodología para la optimización de plantas binarias geotérmicas de media temperatura. Las temperaturas de entrada de fluido geotérmico considerados están en el rango de 110 - 160 °C, mientras que la temperatura de retorno de la salmuera se supone que es entre 70 y 100 °C. El análisis muestra que el consumo específico de salmuera, van desde 20 a 120 kg/s para cada MW producido, y la eficiencia de las plantas van desde 20 a 45 % en términos de eficiencia, Segunda Ley. En el proceso es de gran influencia la temperatura de entrada de la salmuera, la temperatura de rechazo de la salmuera y el ciclo de conversión de energía que se utiliza. Para condiciones de funcionamiento dadas y con la coincidencia correcta entre el fluido de trabajo y ciclo de conversión de energía, es posible obtener rendimientos muy similares en un número de casos diferentes. Se demuestra que la optimización de la planta puede obtener mejoras de hasta 30 - 40 % en términos de reducción del consumo de salmuera en comparación con el diseño convencional.

Por otro lado, la energía geotérmica es una parte importante de los suministros de electricidad de Nueva Zelanda debido a su atractivo costo y confiabilidad. Plantas de ciclo binario han sido importadas e instaladas en varios campos geotérmicos en Nueva Zelanda, con planes para una mayor expansión. La potencia de salida de estas plantas se deteriora en verano ya que la eficiencia de la planta depende directamente del yacimiento geotérmico y la temperatura ambiente. Ya que estas plantas normalmente usan condensadores enfriados por aire, la incorporación de un sistema de agua enfriada podría mejorar la potencia de salida en verano, haciendo coincidir el pico de demanda de aire acondicionado. Por lo que en el año (2009) se analizó, la generación de energía para la planta Rotokawa usando un desempeño similar de la planta y clima local [31]. El desempeño mejorado fue modelado para la modificación con un sistema de enfriamiento húmedo. El incremento de la generación máxima en el día más caluroso podría ser del 6.8 %. Con la capacidad de la unidad binaria de generación actual en la planta Rotokawa de 35 MW, la inversión en un sistema de agua enfriamiento por aire

podría proveer 2 MW de generación pico en los días más calurosos.

En el año 2008 en Turquía, se realizó una investigación paramétrica de una planta de potencia geotérmica. Se efectuó el análisis exergético de la planta binaria utilizando datos reales para evaluar el rendimiento y determinar sitios de destrucción de exergía. La destrucción de exergía en toda la planta se cuantificó y se ilustró mediante un diagrama de exergía, y en comparación con el diagrama de energía [32]. Los sitios con mayor destrucción de exergía incluyen la reinyección de salmuera, intercambiador de calor y el condensador. También en el trabajo se presentan las eficiencias exergéticas de los principales componentes de la instalación.

En México en el 2008, se realizó un estudio del aprovechamiento del vapor endógeno residual para plantas de ciclo binario. El análisis consistió básicamente en incrementar la generación eléctrica de la central geotermoeléctrica [33]. También se presentó una descripción general de la configuración de la unidad eléctrica, así como un estudio para el manejo de un químico peligroso como lo es el isopentano.

La descripción breve de las publicaciones anteriores son los estudios más recientes y enfocados a los sistemas multiproducto y la relación que existe en algunos casos con la energía geotérmica.

1.5. Definición del problema

La demanda energética aumenta a medida que crecen las necesidades tecnológicas de los seres humanos. Es inevitable dejar de consumir energía, el inconveniente es que esta energía generalmente proviene de un recurso no renovable (combustible fósil). Por otra parte, el uso de combustibles fósiles asociados a la producción de energía es la principal causa del cambio climático.

Por lo anterior, el calentamiento global es atribuible a la actividad humana y a los procesos ineficientes de transformación de la energía, principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero (bióxido de carbono). La baja eficiencia energética en los procesos de transformación de la energía, incrementa el consumo de la misma y por consiguiente los precios y las emisiones a la atmósfera de gases nocivos.

La producción de energía en base a energías renovables aún se encuentra en etapa de maduración en México, siendo la energía geotérmica una de las más utilizadas pero no del todo explorada ya que México cuenta con un gran potencial de energía geotérmica que no es aprovechado.

Por otra parte, los procesos que utilizan energía geotérmica de mediana y baja entalpía no son muy implementados y generalmente desaprovechan una gran cantidad de energía útil, colateralmente la utilización en cascada de la energía geotérmica aún no es muy conocida, por lo que es poco explorada su implementación en sistemas multiproducto.

Actualmente existen muy 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 muy común el uso del recurso geotérmico tras ya haber sido utilizado, y menos común utilizarlo en diferentes niveles térmicos que van de desde una mayor demanda de energía a una menor demanda, en otras palabras, el uso de la energía geotérmica en cascada aun no es muy utilizado.

1.6. Justificación

Debido al alto consumo de energía y a que la producción de energía es la principal causa del calentamiento global, es necesario disminuir el consumo de la energía. Para la sociedad moderna resulta difícil reducir los consumos de energía, por el contrario la demanda energética cada día es mayor. Debido a esta situación, es necesario utilizar procesos que optimicen la energía, tal es el caso de los sistemas multiproducto y mejor aún activarlos mediante una energía renovable como es la geotermia.

En los ciclos binarios se desperdicia una gran cantidad de calor que podría ser utilizada en cascada en algún sistema multiproducto logrando con ello una mejor utilización de la energía, por lo que se tendría muchos beneficios, por una parte la energía geotérmica que no requiere de combustibles fósiles y por otro lado desperdiciar menos energía al recuperar el calor de desecho.

1.7. Objetivo

El objetivo principal es el diseño e integración de un sistema multiproducto en cascada para generación de electricidad, calor y frío, utilizando recursos geotérmicos de mediana y baja entalpía.

1.7.1. Objetivos específicos

Para cumplir el objetivo general se han formulado los siguientes objetivos específicos:

1. Reunir información de la utilización en cascada de la energía geotérmica.
2. Integración y diseño del sistema multiproducto utilizando la energía geotérmica en cascada.
3. Identificación y evaluación de los parámetros de comportamiento.
4. Análisis energético del sistema integrado.
5. Análisis del termodinámico del sistema en cascada.
6. Análisis técnico-económico del sistema.
7. Análisis exergoeconómico del sistema.

1.8. Hipótesis

Mediante el uso e implementación de la energía geotérmica en cascada en los sistemas multiproducto, se puede obtener una mayor eficiencia energética en los procesos de transformación de la energía, se reducen los precios y consumos de energía, y también disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los sistemas multiproducto se pueden diseñar e integrar en diversas aplicaciones, por lo que se cubrirían las demandas de calor, electricidad y frío que a diario requieren procesos industriales, conjuntos de viviendas e invernaderos.

Los sistemas en cascada mejoran el aprovechamiento de la energía en ciclos binarios ya que mediante su implementación se recupera la energía térmica que se desaprovecha en estos procesos. Con el uso de los sistemas multiproducto, se evita el elevado consumo de combustibles fósiles y también de energía eléctrica que se utiliza para climatizar mediante los sistemas de refrigeración por compresión.

Capítulo 2

ENERGÍA GEOTÉRMICA Y SU USO EN CASCADA

2.1. La energía geotérmica

De todos es sabido que el interior de la Tierra está caliente y que, a medida que se profundiza hacia el interior de ella se encuentran temperaturas crecientes, ver Figura 2.1. A veces no se llega a percibir cómo el calor de la Tierra se disipa hacia su parte más externa.

Como se aprecia en la Figura 2.1, conforme se incrementa la profundidad o en acercamiento al núcleo de la tierra, también se aumenta la temperatura de la misma. La Energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra [16].

La energía geotérmica tiene su origen en la diferencia de temperaturas que existe en el interior de la tierra. Una vez en superficie, el fluido geotermal, en función de su contenido en calor, se destina a la producción de energía eléctrica, si es posible, y en caso contrario, se aprovechará su calor directamente recurriendo al empleo de intercambiadores de calor, o de bombas de calor en caso necesario, todo depende de las características del fluido geotérmico [15]. La Figura 2.2, muestra el esquema conceptual de la energía geotérmica destinada a la producción de electricidad (campo geotérmico).

2.2. Clasificación del recurso geotérmico

El recurso geotérmico, de acuerdo con lo señalado anteriormente, lo constituye el calor del interior del globo. Es por ello que el objetivo de la geotermia es el aprovechamiento de

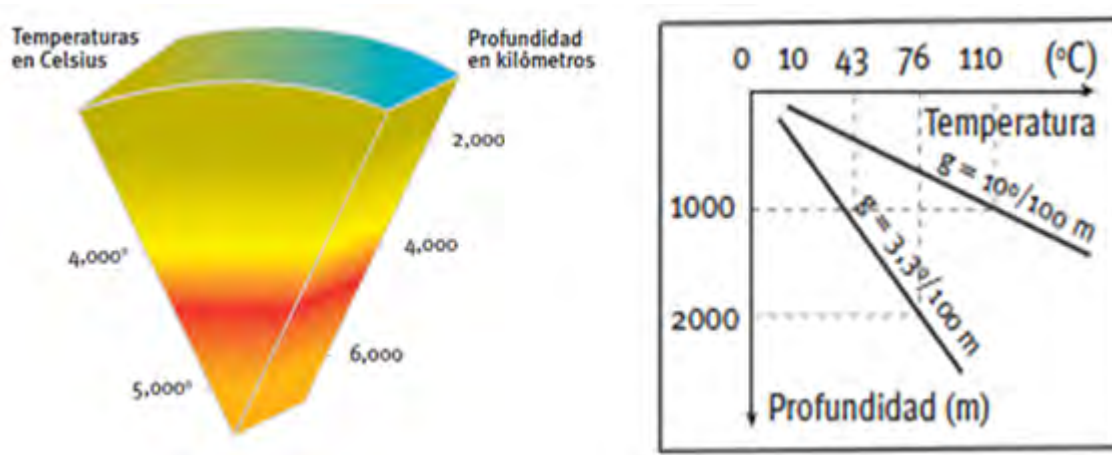


Figura 2.1: Variación de las temperaturas de la tierra en función de la profundidad [16].

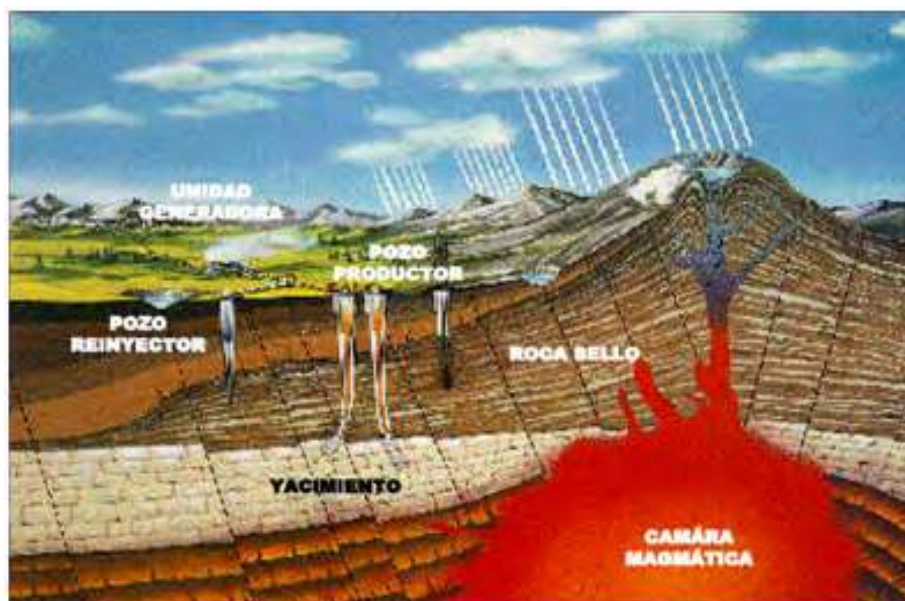


Figura 2.2: Esquema conceptual de un campo geotérmico [26].

esa energía calorífica del interior de la Tierra. Sin embargo, al menos en principio, para que esa energía pueda ser aprovechada se necesita que se acumule en algún cuerpo del interior de la corteza. La forma más común de concentración es en el agua que rellena los poros y huecos de las formaciones rocosas que constituyen la litosfera y actúa como captador y transmisor de la energía geotérmica. El agua contenida en la “esponja” que constituyen ciertos materiales geológicos permeables, adquiere los niveles energéticos (temperatura y presión) que la energía proveniente del interior del globo le transfiere. Como consecuencia de las condiciones termodinámicas del sistema agua-roca, el agua adquiere características químicas específicas determinadas por el equilibrio fisicoquímico que se produce en el interior de la litosfera, enriqueciéndose en sales minerales provenientes de la disolución del esqueleto rocoso que le alberga. De esta forma, el fluido geotérmico, agua cargada en sales minerales en condiciones de presión y temperatura adecuadas, sirve de vehículo para el aprovechamiento de la energía proveniente del subsuelo [16].

Se denomina recurso geotérmico a la porción de calor desprendido desde el interior de la Tierra que puede ser aprovechado por el hombre en condiciones técnicas y económicas. Es decir, tan sólo la fracción de calor del globo, que las técnicas que en cada momento estén disponibles permitan un aprovechamiento en condiciones económicas adecuadas, se considera como recurso geotérmico. Cuando se dan las circunstancias adecuadas para que unos materiales permeables llenos de agua intercepten el flujo de calor desde el interior del globo, y a su vez estos materiales se encuentren suficientemente “sellados” en su parte inferior y superior por materiales impermeables, se dan las condiciones favorables para la existencia de un yacimiento geotérmico. De este modo, las condiciones clásicas para la existencia de un yacimiento geotérmico son la presencia de:

- Un foco de calor activo.
- Un material permeable con su base impermeable (el almacén geotérmico) por el que circula un fluido (en general agua de origen meteórica, en fase líquida o vapor).
- Y una cobertera o sello que impida (o al menos limite) el escape del fluido.

Se conoce así como yacimiento geotérmico el espacio de la corteza terrestre en el que se localizan materiales permeables que albergan un recurso geotérmico susceptible de ser aprovechado por el hombre [16]. La figura 2.3, muestra un esquema simplificado de un yacimiento geotérmico.

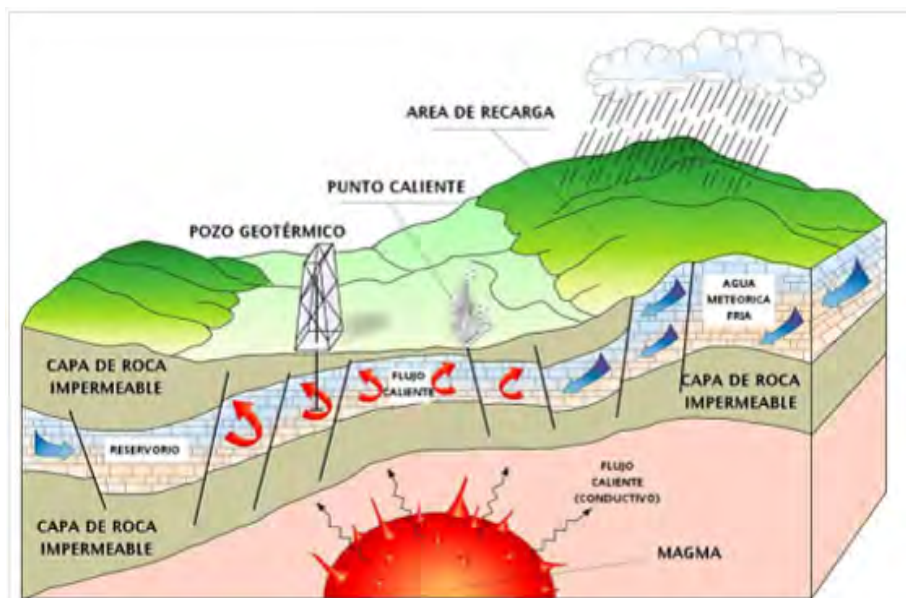


Figura 2.3: Esquema generalizado de un yacimiento geotérmico [34].

2.2.1. Características de los sistemas geotérmicos

Los sistemas geotérmicos convencionales se clasifican de acuerdo con los niveles energéticos de los recursos que albergan, es decir, de los fluidos en ellos contenidos. Como se ha mencionado anteriormente, la energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra y dependiendo del tipo de yacimiento del que se obtenga, ésta tiene ciertas características y aplicaciones. La Figura 2.4, muestra de manera resumida las aplicaciones industriales y comerciales de acuerdo con la temperatura de la energía geotérmica.

Como se puede apreciar en la Figura 2.4, dependiendo del nivel térmico del fluido geotérmico este tiene ciertas aplicaciones. La temperatura que posee el fluido geotérmico depende de yacimiento geotérmico de donde se obtenga. A continuación se realizará una descripción muy general de los tipos de yacimientos:

Yacimientos de baja entalpía

Los yacimientos de baja entalpía corresponden a zonas estables de la corteza, con flujos de calor y gradientes geotérmicos normales que aprovechan los fluidos calientes contenidos en acuíferos profundos, en general sin cobertera impermeable. Tal como se ha expresado, el nivel térmico del fluido condiciona claramente su aprovechamiento. En los casos de yacimientos de baja entalpía su utilización más habitual es la calefacción de viviendas y locales cuando las temperaturas se sitúan entre 50 y 100 °C. Los fluidos con temperaturas inferiores suelen ser

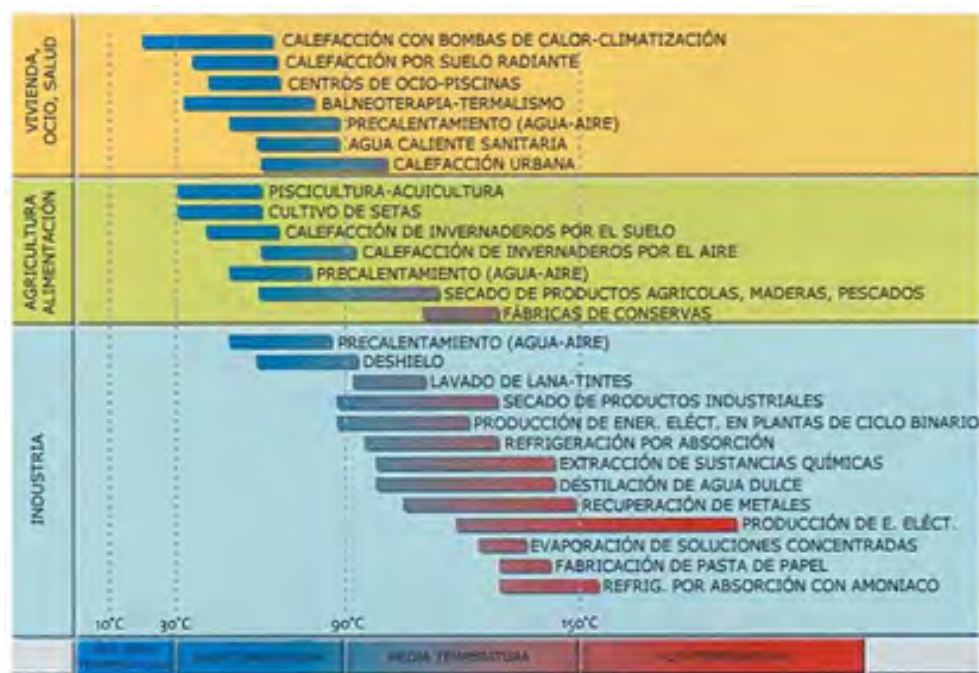


Figura 2.4: Aplicaciones de la energía geotérmica de acuerdo con la temperatura [35].

utilizados en instalaciones balnearias, ya que su nivel térmico no permite otras aplicaciones [16].

Los yacimientos de baja entalpía como ya se mencionó son aquellos en los que la temperatura se encuentra por debajo de los 100 °C y se utilizan en usos directos del calor [36]. En la Figura 2.5, se muestra un ejemplo de uso directo (calefacción) y enfriamiento.

Cuando el flujo de calor que proviene del interior de la Tierra atraviesa los sedimentos permeables más superficiales que albergan aguas subterráneas, confiere a este agua una estabilidad térmica notable, lo que permite extender el concepto de yacimiento de baja entalpía; se habla entonces de yacimientos geotérmicos de muy baja entalpía, con temperaturas de los fluidos subterránea entre 15 y 22 °C, que pueden ser aprovechados desde el aspecto energético, para usos de calefacción-climatización, mediante el uso de la bomba de calor que permite aplicar un pequeño salto térmico de niveles de temperatura bajas para aportar calor a temperaturas muy superiores [16].

Yacimientos de media entalpía

La temperatura de estos yacimientos se localiza entre los 100 y 150 °C y se utilizan para la producción de electricidad mediante ciclos binarios [36]. Generalmente los ciclos binarios son Ciclos Rankine Orgánicos (ORC) y generalmente utilizan isopentano o salmuera como fluido de trabajo. La Figura 2.6, muestra el ejemplo de un ciclo binario.

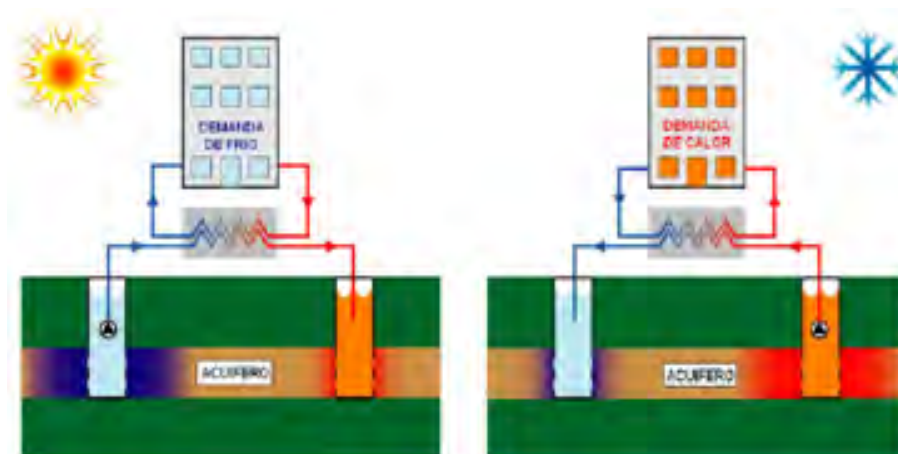


Figura 2.5: Uso directo de calor (calefacción) y enfriamiento [37].

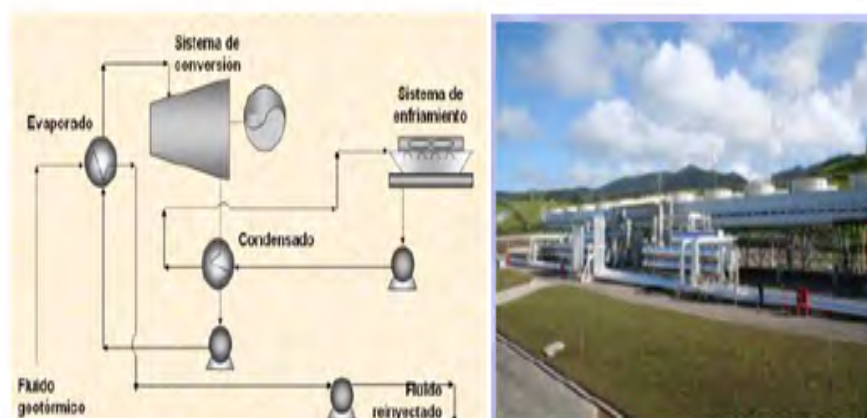


Figura 2.6: Ciclo binario [35].

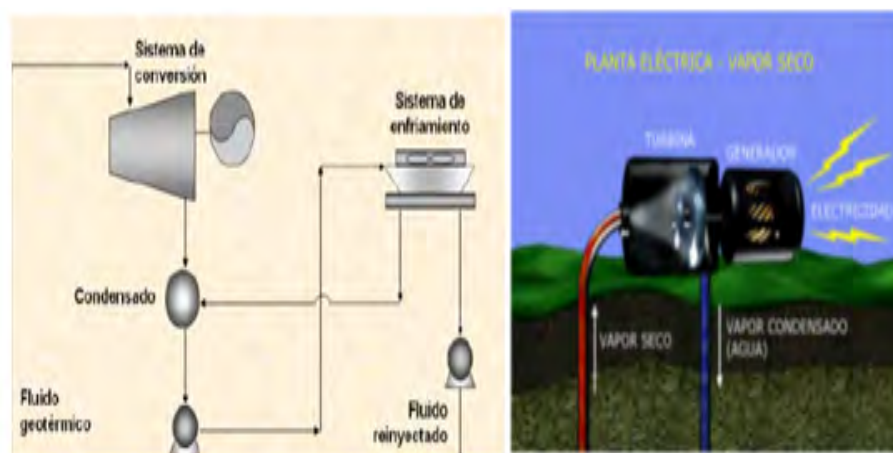


Figura 2.7: Producción de electricidad mediante vapor geotérmico [35].

Yacimientos de alta entalpía

Los yacimientos de alta temperatura, son aquellos en los que la temperatura se encuentra por encima de los 150 °C y se utilizan para la producción de electricidad [36]. La Figura 2.7, muestra un ejemplo de la producción de electricidad mediante energía geotérmica.

En general, los yacimientos de alta entalpía se localizan en zonas de flujo de calor anómalo, y generalmente son sistemas con altas profundidades, de hasta de 4,000 metros por debajo de la superficie [16].

2.3. Usos directos de la energía geotérmica

Bajo la denominación de utilización directa, o inmediata, de la energía geotérmica se engloban diferentes formas de obtener calefacción, refrigeración o aire acondicionado, y de producir agua caliente sanitaria, que excluyen el empleo de dicha energía para producir energía eléctrica. Las aplicaciones, que abarca 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 [15].



Figura 2.8: Spa situado en Erding (Alemania) [15].

2.3.1. Natación, baños y balneología

La energía geotérmica utilizada en forma de calor, a nivel mundial, para natación, baños y balneología en el año 2005 ascendió a 83.018 TJ (2.306 GWh/año), que 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 [15].

En la Figura 2.8, se muestra una piscina de agua caliente. El agua del vaso circula por un circuito secundario cerrado, y se calienta en un intercambiador de calor.

En otros lugares del planeta, con climatología más benigna, simplemente se requiere la temperatura justa para calentar el agua de una piscina a unos 28 - 30 °C, cuyo vaso está situado en el exterior, donde el sol contribuye a mantener la temperatura del agua. Es por estas causas por las que el margen de temperaturas recogido en los cuadros de usos directos del calor es uno de los más amplios, desde los 40 °C hasta los 90 °C, según el tipo de aplicación que requiera, como los mencionados de piscinas abiertas o cerradas. Son excepcionales las



Figura 2.9: Esquema del suministro de ACS a edificios mediante energía geotérmica [15].

aplicaciones de acuíferos profundos a la Balneoterapia o baños de aguas medicinales tópicas. Por su propia naturaleza de uso, la aplicación ha de desarrollarse en circuito abierto [15].

2.3.2. Calefacción de edificios y producción de ACS

La capacidad total instalada en 17 países, para calefacción y refrigeración de edificios y para producción de agua caliente sanitaria, en el año 2005, era de 3.591 MWt, y el uso global que se hizo del calor geotérmico ascendió a 43.281 TJ (12.857 GWh). En la Figura 2.9, se muestra una aplicación típica de circuito cerrado para abastecimiento de calefacción y aporte de 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.

La entrega en los edificios terminales (puntos de demanda) se realiza a través de tuberías calorifugadas convenientemente, al objeto de producir en ellas las menores pérdidas posibles

de calor. En los puntos de entrega, los sistemas convencionales de calefacción se encargan de la disipación final del calor en el ambiente a climatizar. Estos sistemas son los ya conocidos de radiadores, suelos radiantes, corrientes de aire calentado, etc., cada uno con sus rendimientos característicos [15].

2.3.3. Calefacción de invernaderos

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. Es evidente que los invernaderos existentes en zonas del planeta que disfrutan de abundantes horas de sol, no precisan de un calentamiento ajeno al producido por el astro de nuestro sistema planetario; el crear ambientes cerrados con plásticos que permiten el paso a la luz solar y encierran la humedad ambiente, pretende crecimientos rápidos y cosechas de frutos, incluso fuera de estación. Sin embargo, en zonas desfavorecidas por estos elementos, es posible recrear un ambiente similar, con la única ausencia de las radiaciones solares [15].

Como se puede apreciar en la Figura 2.10, 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 frutos carnosos precisan una radiación más directa, como en la figura a). 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.

En una buena parte de cultivos, los resultados obtenidos son espectaculares y las ventajas que aporta el sistema de invernaderos son numerosas:

- Producción de especies no naturales de la zona por su climatología.
- Elección de la época de siembra, según demandas de mercado.
- Aumento del número de cosechas y abundancia de las mismas.
- Mejora de la protección contra enfermedades y parásitos.

En la Tabla 2.1, puede verse una comparación entre las producciones naturales y las obtenidas en invernaderos calafateados por sistemas derivados de la energía geotérmica.

Como se puede apreciar en la Tabla 2.1, es muy notable el aumento del rendimiento que puede extraerse de unos suelos y una climatización adecuada. El rango de temperaturas

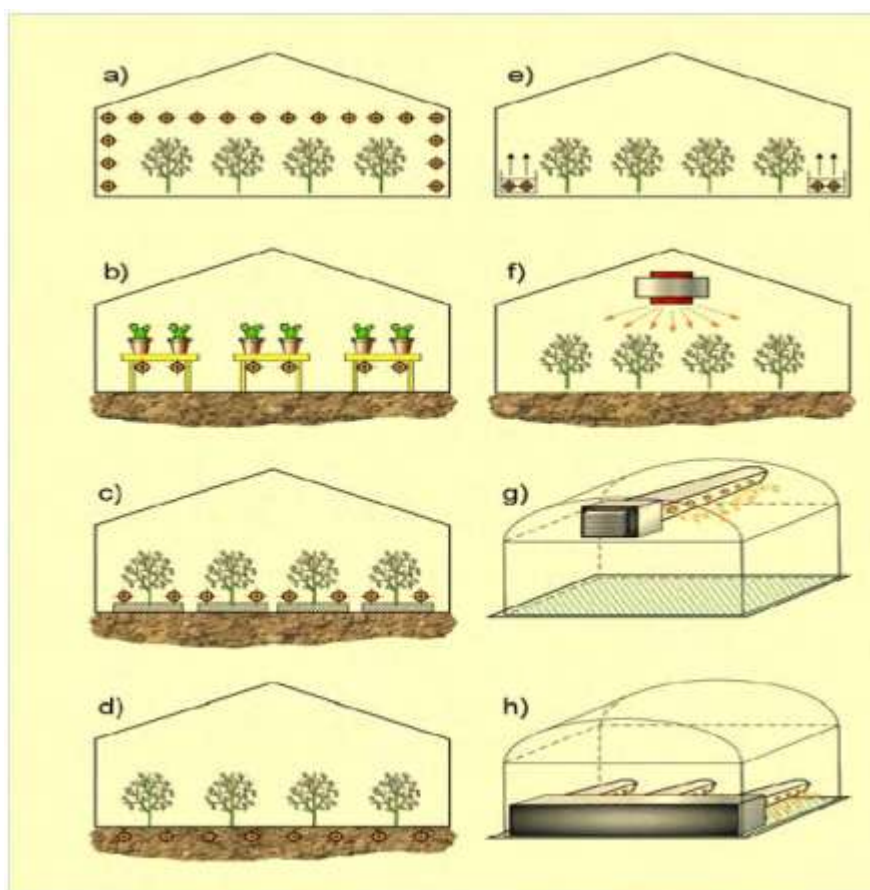


Figura 2.10: Diversas formas de empleo de calor en invernaderos [15].

Tabla 2.1: Rendimientos y producciones en invernaderos y con sistemas naturales [15].

Tipo de Cultivo	Producción (t/año)	Cosechas/año	Rendimiento anual (t/año)	Tradicional Rendimiento anual (t/año)
Frijol	11.5	4	46	6
Repollo	57.5	3	172.5	30
Pepino	250	3	750	30
Berenjena	28	2	56	30
Lechuga	31.3	10	313	52
Pimiento	32	3	96	16
Tomate	187.5	2	375	100



Figura 2.11: Disipación de calor en invernaderos [15].

necesarias para un aprovechamiento de este tipo es bastante amplio, oscilando desde los 40 °C para calentamiento de suelos directamente o por retorno de aguas ya utilizadas, hasta los 80 y 90 °C de las aguas geotermales para crear corrientes de convección, a partir del circuito secundario, que calentarán el ambiente general del invernadero.

En la Figura 2.11, se observan unas vistas de invernaderos con los disipadores finales de calor por aire (turboconvección) y de la posible combinación de variedades de especies que pueden compartir la serie de procedimientos para climatizar los invernaderos.

2.3.4. 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 [15]. En la Figura 2.12, puede apreciarse el momento de trasvase de alevines de un tamaño dado al tanque siguiente de crecimiento.

La temperatura del recurso es determinante para dimensionar la capacidad de las instala-



Figura 2.12: Criadero piscícola climatizado con energía geotérmica [15].

ciones piscícolas. Lo más normal es que las aguas geotérmicas no puedan usarse directamente en los tanques en circuito abierto, sino que deberá acudir al proceso de intercambiar el calor geotérmico a un circuito secundario que constituye el agua de crianza de los tanques. La variación de temperatura requerida por las especies piscícolas varía entre 20 y 30 °C, lo que requiere una temperatura del recurso oscilando entre los 45 - 60 °C [15].

2.3.5. 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.

La manipulación de alimentos frescos requiere grandes inversiones en transportes de alto costo, pues dependen de márgenes muy escasos de tiempo antes de que dichos alimentos puedan deteriorarse. La deshidratación por secado de los alimentos permite una estabilización de los mismos, un mayor tiempo de almacenamiento y, por ello, disponer de tiempo para transportes compartidos y cadenas de distribución que abaratan costos al crecer el volumen de los productos. 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 [15].

Por otra parte, a elevadas temperaturas y manteniendo la humedad adecuada, pueden ser curados incluso hormigones de fraguado. En el secado de la madera es donde las aplicaciones de la energía geotérmica han alcanzado una importancia apreciable. El secado de las maderas por medios naturales requiere unos tiempos que no son aceptables para la industria moderna. Los secaderos artificiales de madera requieren tiempos largos, de alto coste de suministro de aire caliente empleando medios convencionales. El calor geotérmico puede producir una disminución de los mismos, pues la fuente es continua una vez puesta en marcha. Si puede compartirse con otra aplicación, su rentabilidad puede ser muy alta [15].

2.3.6. Otras aplicaciones

En general, serían innumerables las aplicaciones industriales que aprovecharían el calor geotérmico; en realidad, todas aquellas que precisen de un tratamiento de calor o vapor de agua en su elaboración.

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 [15]. En la Figura 2.13, se puede apreciar un complejo industrial que utiliza calor geotérmico, para fabricación de pasta de papel, secado de madera y producción de energía eléctrica.

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 [15].

Otras aplicaciones se enmarcan en el sector de la minería, para explotación de minerales industriales y recuperación de metales.



Figura 2.13: Complejo industrial de Kawerau, Bahía de Plenty. Nueva Zelanda [15].

2.4. Usos para generación de electricidad

Como ya se ha mencionado anteriormente para la producción de electricidad se requiere una adecuada temperatura, por lo que es necesario estudiar qué posibilidades ofrece la producción de vapor y la presión que se puede obtener. Dependiendo de las características del fluido geotérmico se utilizan ciertos ciclos de producción de potencia.

2.4.1. Ciclos de vapor seco

Los campos de vapor seco (tan sólo unos pocos casos en el mundo) son los que permiten utilizar la tecnología más sencilla ya que el fluido geotérmico se puede llevar directamente a la turbina para producir electricidad. La producción del vapor en los sondeos es por expansión al reducir la presión, de modo muy similar a la producción de gas natural. Están formados principalmente por una serie de sondeos o pozos de captación que permiten captar la mezcla agua-vapor. Ya sobre el terreno, con un separador vapor-agua, extraen el vapor que hace funcionar el grupo turbogenerador para la producción de electricidad. Después de este proceso, el vapor condensado y el fluido remanente geotérmico se vuelven a reinyectar por un circuito cerrado a las profundidades para volver a reanudar el ciclo [38].

Este tipo de planta se utiliza para producir energía de reservorios de vapor dominante cuya temperatura varía en el rango de 300 - 350 °C [39]. El vapor saturado ligeramente

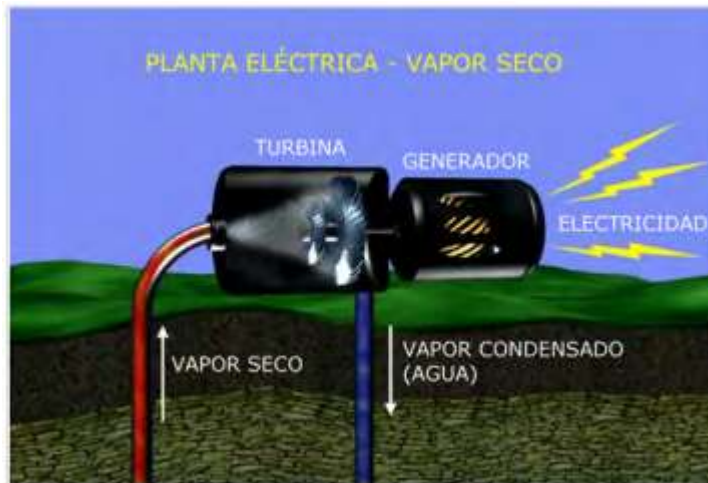


Figura 2.14: Esquema de un ciclo directo sin condensación [35].

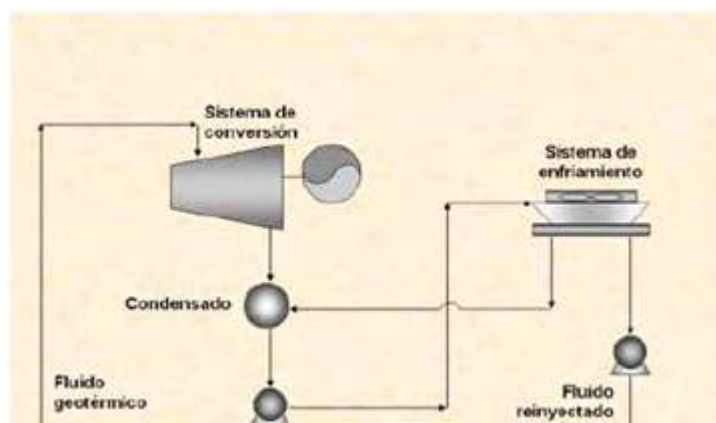


Figura 2.15: Esquema de un ciclo directo con condensación [36].

recalentado, es conducido como ya se ha menciona directamente al turbina.

Una vez que el fluido ha realizado trabajo en la turbina, éste tiene una pérdida paulatina de presión y de temperatura, por lo que se convierte a un estado líquido (aún con la presencia de alguna parte en fase vapor). Si el fluido se desecha de la turbina a la atmosfera, o bien, se decide que sea reinyectado al acuífero a través de un pozo de reinyección al ciclo se le denomina ciclo directo sin condensación. La Figura 2.14, muestra un ciclo directo sin condensación

Si el fluido después de abandonar la turbina pasa por un dispositivo (condensador) que le permita ceder su energía, al ciclo se le llama ciclo directo con condensación. La Figura 2.15, muestra un esquema de un ciclo directo con condensación.

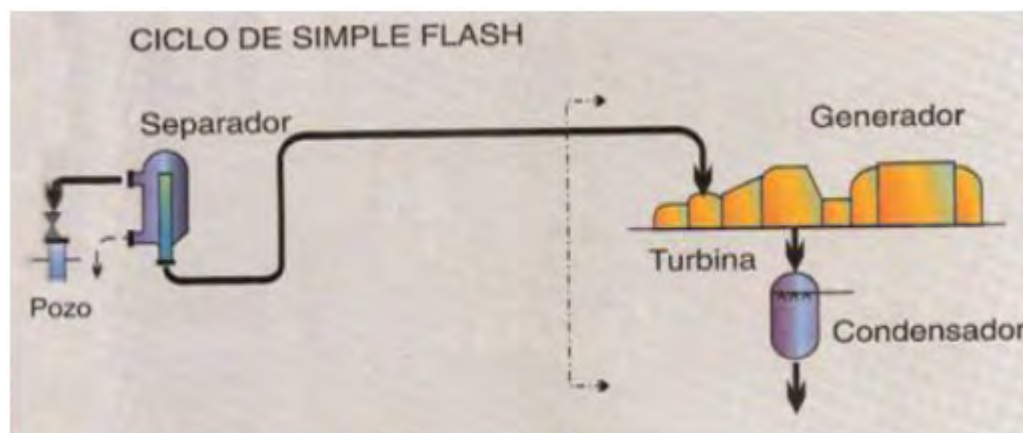


Figura 2.16: Esquema de una planta simple-flash [38].

2.4.2. Plantas flash

Es prácticamente imposible conseguir que el vapor esté absolutamente seco, lo cual constituye el primer inconveniente para la producción de energía eléctrica. En efecto, las pequeñas gotas de agua que puede arrastrar el vapor, a la presión a la que impactan con los álabes de la turbina, producen un desgaste excesivo, cuando no su ruptura. Para evitar este extremo, es práctica habitual colocar a la salida del vapor del pozo de alimentación un separador centrífugo de agua, que elimina una buena parte del agua que contiene el vapor (proceso flash). Mediante el proceso flash, se consigue mejorar la calidad del vapor, elevando así el rendimiento de la turbina y ahorrando recursos económicos en el mantenimiento y operación de la misma [15].

El recurso hidrotérmico que utiliza este tipo de planta está en forma líquida, su temperatura suele variar 150 y 360 °C [39]. El tamaño en estas plantas depende de las características del vapor, presión y el contenido de gases, los tamaños de turbina típicos están en el rango de 10 MW a 55 MW. Una de las desventajas que presenta este sistema es que el agua contiene sales disueltas y forma una mezcla llamada salmuera, ocasionando problemas de corrosión en las instalaciones geotérmicas [39].

Plantas simple-flash

En este tipo de plantas el vapor geotérmico es pasado solamente una vez por separador. El agua separada se considera de desecho y puede posteriormente ser inyectada en el subsuelo (reinyectada). La mezcla de agua-vapor normalmente tiene una temperatura que supera los 200 °C y el vapor separado una presión entre 8 y 10 kg/cm² [39]. La figura 2.16, muestra un esquema de una planta de simple flash.

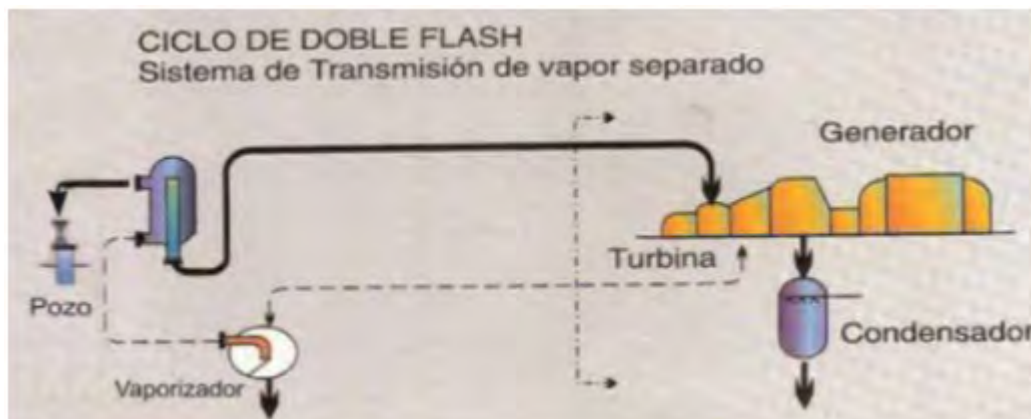


Figura 2.17: Esquema de una planta doble-flash [38].

Plantas doble-flash

En el ciclo de doble flash, el agua caliente restante (de desecho) en vez de reinyectarla, es conducida a un vaporizador (flasher) de baja presión para separar el vapor secundario por flasheo. Este vapor es conducido a continuación a una turbina de baja presión o a la misma turbina de media presión entrando por sus etapas (stages) intermedias. La Figura 2.17, muestra un esquema de una planta doble-flash [38].

Las principales ventajas de un ciclo de doble flash, son las siguientes:

- Se produce entre un 15 y un 20 % más de energía con el mismo suministro geotérmico que el ciclo de simple flash.
- Aunque el coste de inversión de la planta es alrededor de un 5 % más alto que el de simple flash, el costo neto de la energía por kwh es alrededor de 10 a 15 % más bajo.
- Se consigue una presión óptima de entrada a la turbina, un 30 % más alta que con el sistema de simple flash.

2.4.3. Ciclos binarios

Este tipo de plantas permiten extraer energía de forma más eficiente de yacimientos de media temperatura ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y de recursos geotérmicos con elevada salinidad. Se basan en evitar el uso directo del fluido termal y utilizar un fluido secundario con un comportamiento termodinámico mejor que éste. El fluido geotermal entrega el calor al fluido secundario a través de un intercambiador de calor, que se calienta, vaporiza y se expande a través de la

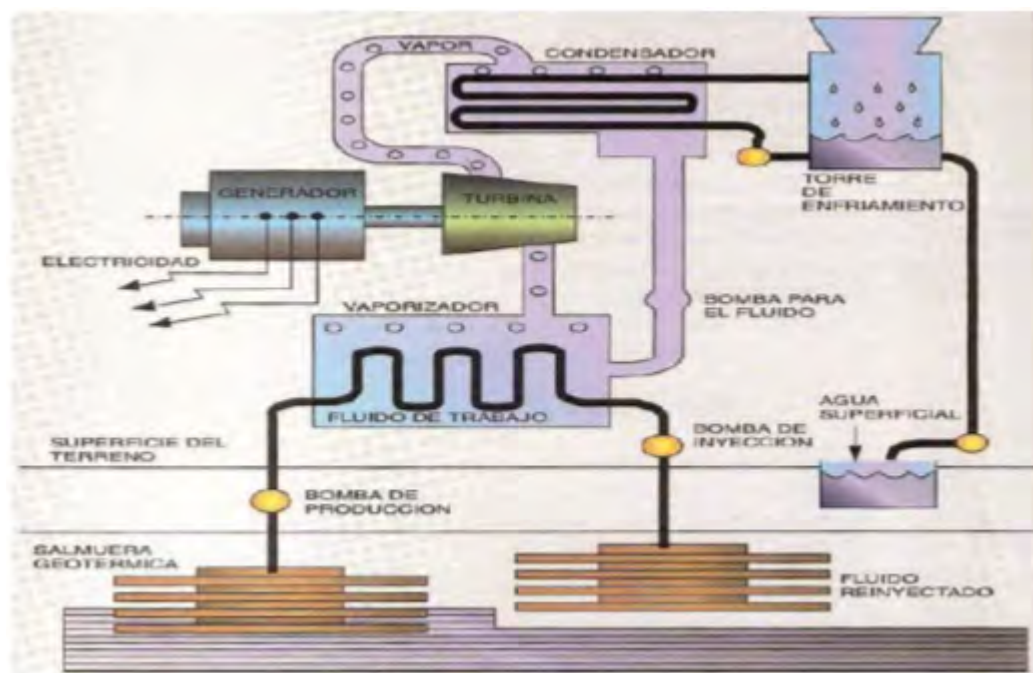


Figura 2.18: Esquema de un ciclo binario [38].

turbina. Se condensa en un condensador de aire o agua y se bombea de nuevo al intercambiador de calor para ser re-vaporizado [38]. La Figura 2.18, muestra el esquema básico de una planta binaria.

Como puede apreciarse, el vapor de origen geotérmico se emplea para ceder energía de forma indirecta al fluido secundario del circuito cerrado. De esta forma se consigue mejorar el rendimiento del grupo turboalternador, desde el punto de vista de la eficiencia del equipo. Sin embargo, el rendimiento general de la totalidad de la instalación se verá reducido por las evidentes pérdidas de una parte de la energía calorífica en el intercambiador de calor.

En estos tipos de central con aguas de aporte geotérmico en el límite superior de los yacimientos de media temperatura, el fluido que se suele hacer circular en circuito cerrado, también alternando las fases líquido-vapor, es distinto del agua y debe caracterizarse por disponer de una reducida temperatura de ebullición. Son comunes las mezclas de hidrocarburos altamente volátiles (de bajo punto de ebullición), como propano, n-butano, isobutano o isopentano, que funcionan en el rango de los 35 °C, en la fase fría [15].

El ciclo binario es muy similar a otros ciclos como el ciclo ORC (por sus siglas en inglés, Organic Rankine Cycle) y ciclo Kalina, pero difieren en que el ciclo binario trabaja mediante dos fluidos que nunca se mezclan y aparte generalmente no existe alguna combustión.

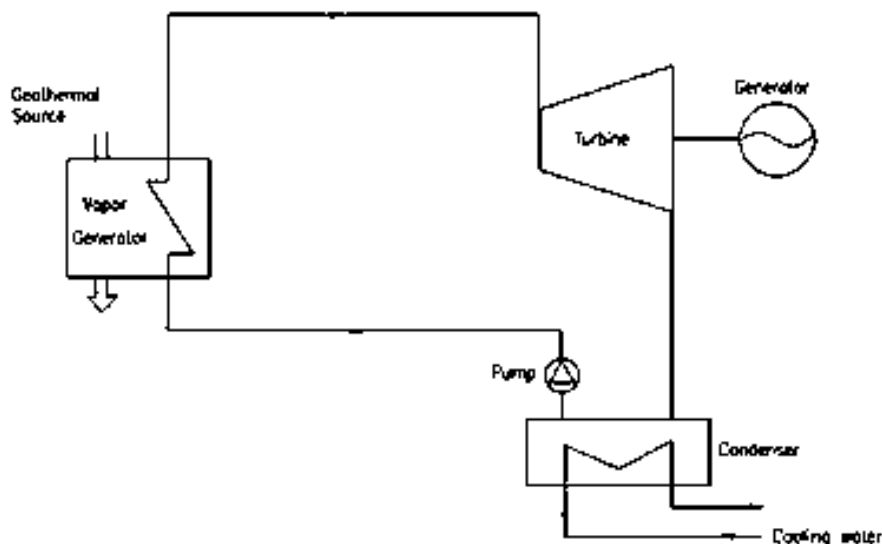


Figura 2.19: Esquema de un ciclo Rankine orgánico [40].

2.4.4. Ciclo ORC

El ciclo ORC es muy parecido al ciclo binario, pero difieren a que el ORC solo emplea un fluido de trabajo (fluido orgánico) y aparte si puede existir una combustión, en otras palabras el ciclo ORC es el circuito cerrado de un ciclo binario. La Figura 2.19, muestra el diagrama de un ORC.

El ORC se basa en un procedimiento parecido a procesos con vapor de agua, pero en lugar de agua se utiliza un fluido de trabajo orgánico (hidrocarburos como isopentano, isooctano, tolueno y aceite de silicona). La Tabla 2.2, muestra los fluidos utilizados en los ORC [41].

En los ORC la energía se produce mediante otro fluido o energía primaria, el ciclo térmico (vapor o aceite térmico) transmite energía mediante un intercambiador de calor o generador al ciclo que acciona la turbina y consecuentemente el generador. En este ciclo no circula agua o vapor de agua sino un fluido de trabajo especial cuyo punto de ebullición está por debajo de los 100 °C por lo que la sustancia pasa del estado de agregación líquido al gaseoso. De esta manera se pueden utilizar incluso aguas termales con temperaturas por debajo de los 100 °C para la generación de energía. Debido a la utilización de sustancias orgánicas como fluidos de trabajo con un punto de ebullición bajo, el proceso es conocido como ORC; refiriéndose al “Ciclo de Carnot” [39].

Por otra parte, los ORC a nivel mundial se están utilizando cada vez más y existen diversos fabricantes de este tipo de tecnología. La Tabla A.1, muestra algunos fabricantes y

Tabla 2.2: Fluidos orgánicos e inorgánicos para ciclo ORC.

Sustancia	Pcritica (MPa)	Tcrit (°C)	Rango (°C)
Acetona	4.7	234.95	276.85 - 94.65
Amoniac	11.33	132.25	426.85 - 77.655
Benceno	4.89	288.9	361.85 - 9.85
Butano	3.79	151.98	315.85 - 138.28
Decafluorobutano	2.32	113.18	226.85 - 84.15
Dodecafluoropentano	2.04	147.41	226.85 - 73.15
Tolueno	4.12	318.61	426.85 - 95.15
Sulfuro de carbonilo	6.37	105.62	376.85 - 138.85
Cis Buteno	4.22	162.6	251.85 - 138.85
Ciclo Hexano	4.05	280.49	426.85 - 6.32
Ciclo Propano	5.57	125.15	199.85 - 0.15
Decano	2.10	344.55	401.85 - 29.65
Dimetileter	5.37	126.95	176.85 - 73.15
Dodecano	1.81	384.96	426.85 - 9.55
Etano	4.87	32.18	351.85 - 182.8
Etanol	6.16	240.78	426.85 - 23.15
Heptano	2.73	266.98	326.85 - 90.6
Hexano	3.03	234.67	326.85 - 95.32
Sulfuro de hidrógeno	9	99.95	486.85 - 85.45
Isobutano (2 Methyl propano)	3.64	134.67	299.85 - 159.59
Isobuteno (2 Methyl, 1 propeno)	4.00	144.94	276.85 - 140.75
Isohexano (2 Methylpentano)	3.04	224.55	276.85 - 153.55
Isopentano (2 Methylbutano)	3.39	187.2	226.85 - 160.5
R152A	4.51	113.26	226.85 - 118.59
R245fa	3.64	154.05	226.85 - 73.15
R21	5.18	178.33	200.04 - 73.15
R22	4.99	96.145	276.85 - 157.42
R32	5.78	78.105	161.85 - 136.81
Metanol	8.10	239.45	346.85 - 97.54

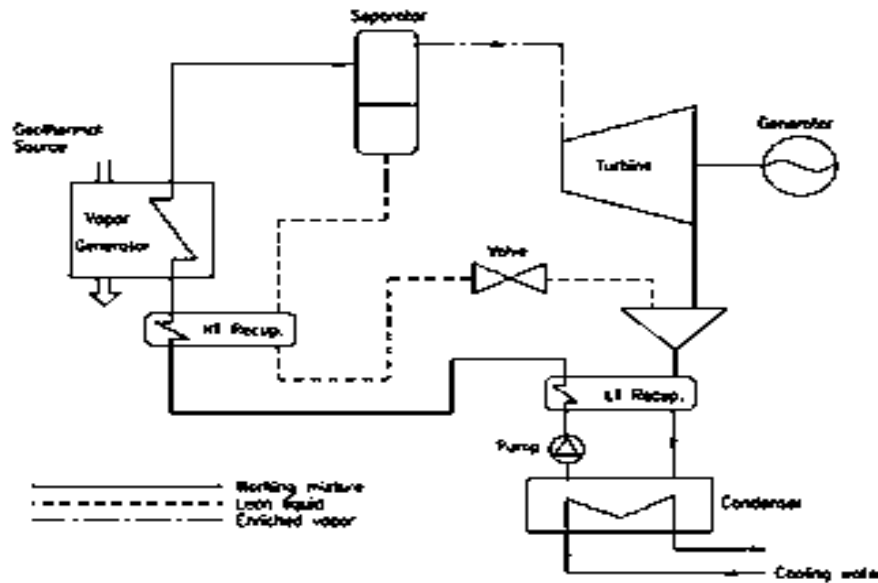


Figura 2.20: Esquema de un ciclo Kalina [40].

parámetros de los ORC [30].

2.4.5. Ciclo Kalina

El ciclo Kalina es una variante del ciclo binario ya que en el ciclo Kalina si existe una mezcla entre ambos fluidos de trabajo (amoníaco-agua) y en el ciclo binario no existe dicha mezcla. Como ya se mencionó el ciclo Kalina utiliza una mezcla de amoníaco-agua como fluido de trabajo para mejorar la eficiencia del sistema y proporcionar una mayor flexibilidad en diferentes condiciones de operación. La Figura 2.20, muestra el diagrama de un ciclo Kalina.

El ciclo Kalina puede mejorar la eficiencia de plantas de energía en un 10 % a 50 % en función de la aplicación. Dado que las temperaturas de operación de las plantas se reducen, la ganancia relativa del ciclo de Kalina aumenta en comparación con el ciclo Rankine [39].

Por otra parte, existen algunos fabricantes de ciclos Kalina que han sido identificados y se muestran en la Tabla A.2 [42].

2.5. Utilización en cascada

Por lo anterior, la energía geotérmica puede ser utilizada en diferentes aplicaciones y diversas tecnologías. Sin embargo, al utilizarla para una sola aplicación y después desechar el contenido de energía que aun contiene el fluido geotérmico, se le está dando un uso ineficiente.

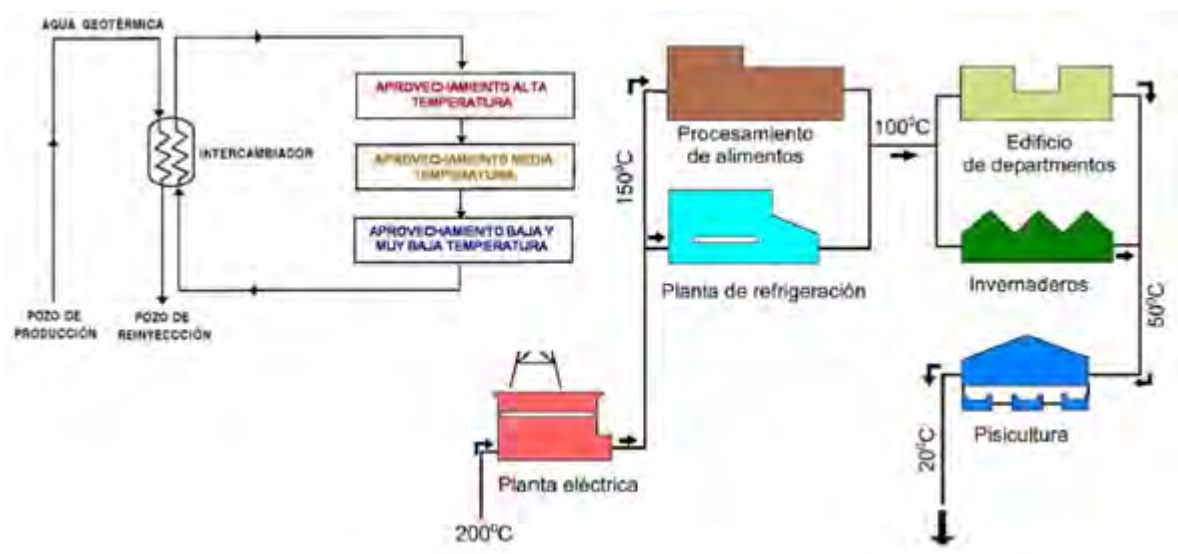


Figura 2.21: Utilización en cascada de la energía geotérmica [16].

El uso de la energía geotérmica puede ser más eficiente si se recupera y se aprovecha al máximo el contenido de la energía del fluido geotérmico, una forma es aprovechando la energía disponible tras haber sido ya utilizada, beneficiándose en distintos niveles térmicos para diferentes usos. De este modo, tras la producción eléctrica, el fluido aún caliente puede ser aprovechado para calefacción de viviendas. Tras un segundo uso, el fluido puede ser aprovechado para otros usos con menores requerimientos de temperatura (calefacción de invernaderos, etc.) [16]. A lo anterior, se le denomina utilización en cascada de la energía geotérmica, ver Figura 2.21.

2.5.1. Analogía con los esquemas multiproducto

Un sistema multiproducto es aquel en el cual se obtienen varios productos a partir de uno o más recursos, a este tipo de sistemas se les conocen comúnmente como sistemas de poligeneración. La Figura 2.22, muestra un esquema generalizado de un sistema multiproducto.

Actualmente existen sistemas muy conocidos, ejemplos de sistemas multiproducto, tales como la cogeneración (CHP, C) y la trigeneración (CHCP, Combined Heat, Cold and Power). En los sistemas de cogeneración se produce calor y electricidad a partir de un recurso, mientras que en la trigeneración se produce adicionalmente frío [1]. La Figura 2.23, muestra un esquema de cogeneración más una (TAT), estos sistemas en conjunto representan un sistema de trigeneración.

Por lo descrito anteriormente, la energía geotérmica puede ser utilizada en este tipo de

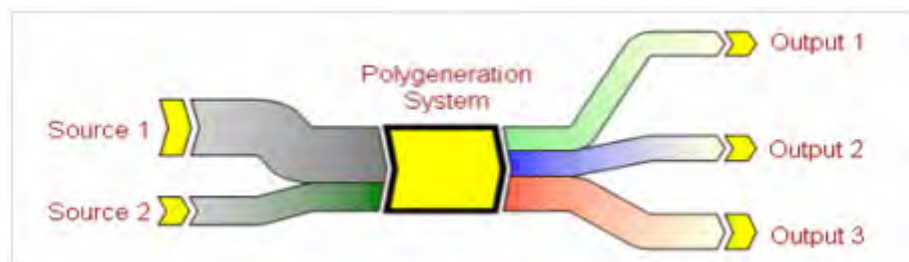


Figura 2.22: Esquema conceptual de un sistema multiproducto [1].

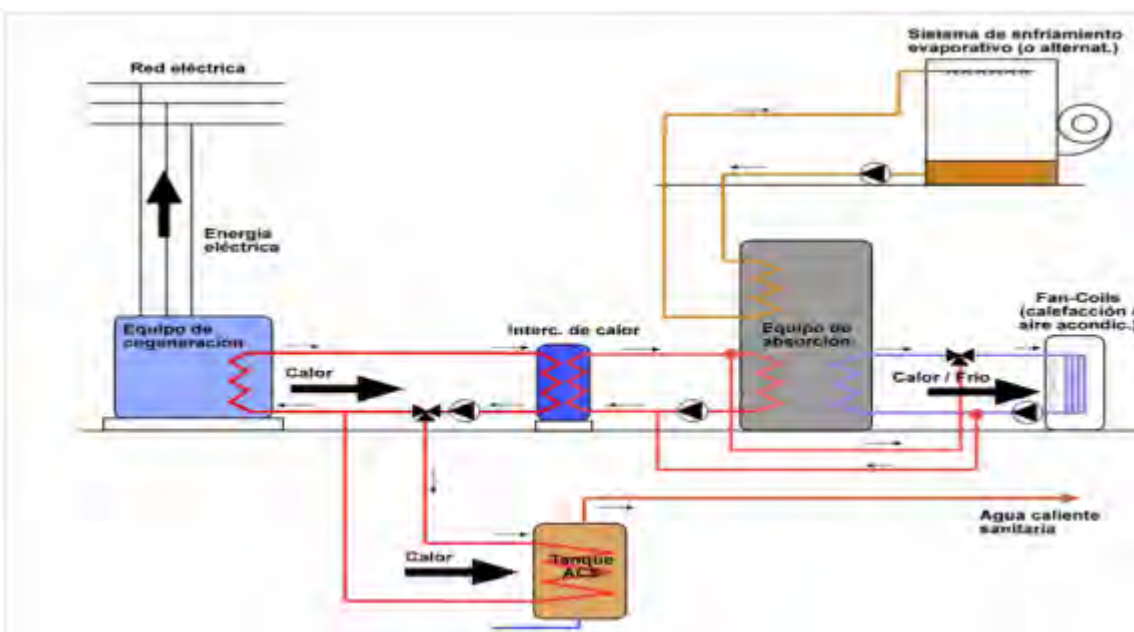


Figura 2.23: Configuración general de un sistema de trigeneración [43].

sistemas que son muy similares a la utilización en cascada, pero la utilización de los recursos geotérmicos, tal como se ha visto, está condicionada por el nivel térmico del fluido.

2.6. Refrigeración por absorción

En un ciclo de refrigeración por absorción la compresión mecánica es sustituida por una compresión termoquímica, ambos procesos tienen características en común pero difieren en dos aspectos importantes. Una diferencia es que en lugar de una compresión del vapor, en un ciclo de absorción el refrigerante es absorbido por una sustancia secundaria, llamada absorbente, para formar una solución líquida. La solución líquida se comprime hasta alta presión. Dado que el volumen específico medio de la solución líquida es mucho menor que el del vapor del refrigerante, el trabajo necesario es significativamente menor. Consecuentemente, los sistemas de refrigeración por absorción tienen la ventaja, respecto a los sistemas con compresión de vapor, de necesitar menor potencia para la compresión. La otra diferencia importante entre los sistemas por absorción y los sistemas de compresión de vapor es que en los primeros debe introducirse un medio para recuperar el refrigerante en forma de vapor a partir de la solución líquida antes de que el refrigerante entre en el condensador. Esto supone transferir calor desde una fuente a temperatura relativamente alta. Para este fin son particularmente económicas las fuentes de calor residual (vapor o agua caliente), combustión directa de gas natural o algún otro combustible [1].

En la Figura 2.24, se muestra el diseño más simple de la máquina de absorción y consiste de un evaporador, un condensador, un absorbedor, un generador y una bomba de solución.

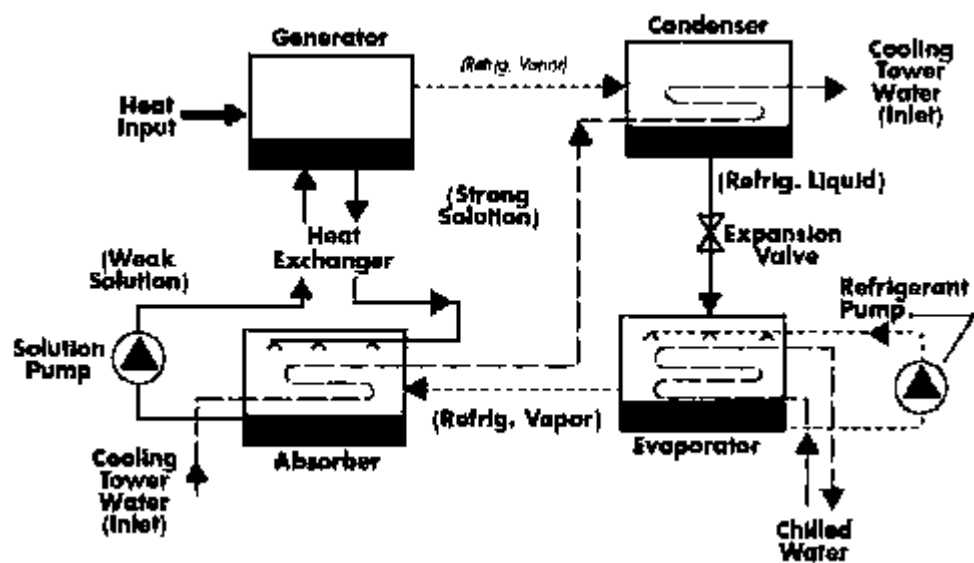


Figura 2.24: Diagrama simple de la máquina de absorción [1].

Capítulo 3

INTEGRACIÓN DEL SISTEMA MULTIPRODUCTO PARA LA GENERACIÓN EN CASCADA

3.1. Esquema conceptual del sistema en cascada

La utilización de la energía geotérmica en cascada, es aprovechar la energía disponible tras haber sido ya utilizada, beneficiándose en distintos niveles térmicos para diferentes usos. El sistema multiproducto que se muestra en la Figura 3.1, utiliza la energía geotérmica en cascada para generar electricidad, calor y frío. La producción de electricidad se logra mediante un de producción de potencia, la generación de frío mediante una tecnología activada térmicamente y la recuperación de calor es utilizada en un conjunto de invernaderos y viviendas.

En la Figura 3.1, se muestra el esquema de la integración en cascada de la energía geotérmica. El fluido geotérmico primeramente pasa por el sistema de generación, en este caso es un ciclo de producción de potencia (motriz primario), una vez que sede parte de su energía al ciclo lo abandona y llega a una TAT para producir frío, después pasa a climatizar a un conjunto de invernaderos y finalmente a un tanque de almacenamiento para proporcionar ACS a un conjunto de viviendas.

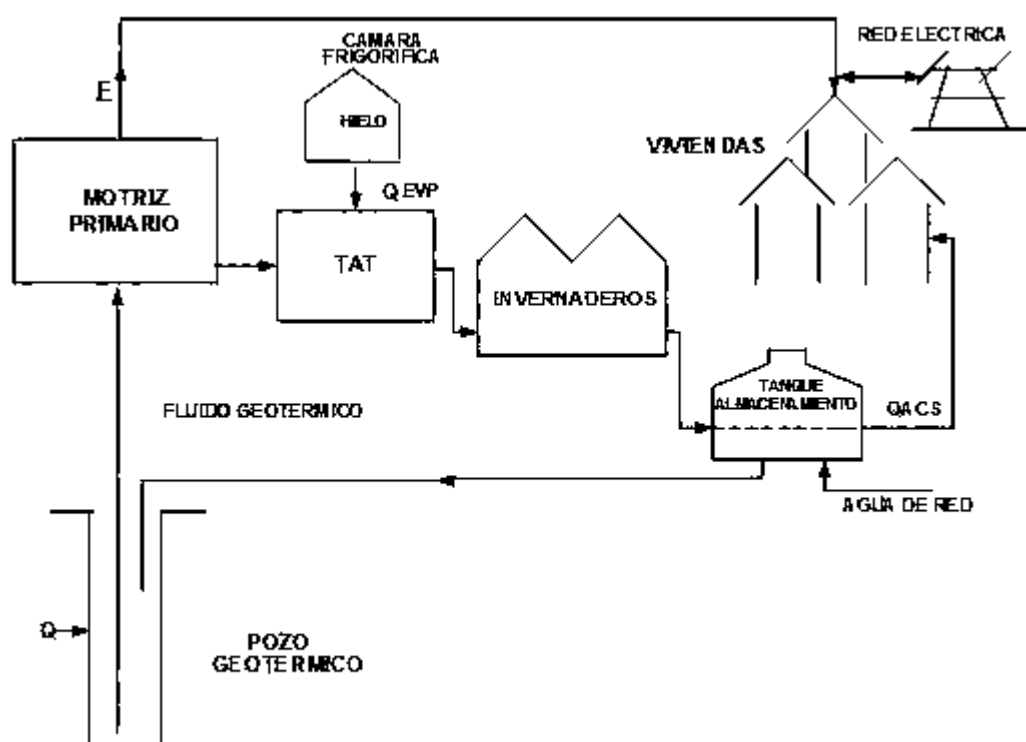


Figura 3.1: Esquema conceptual del sistema multiproducto.

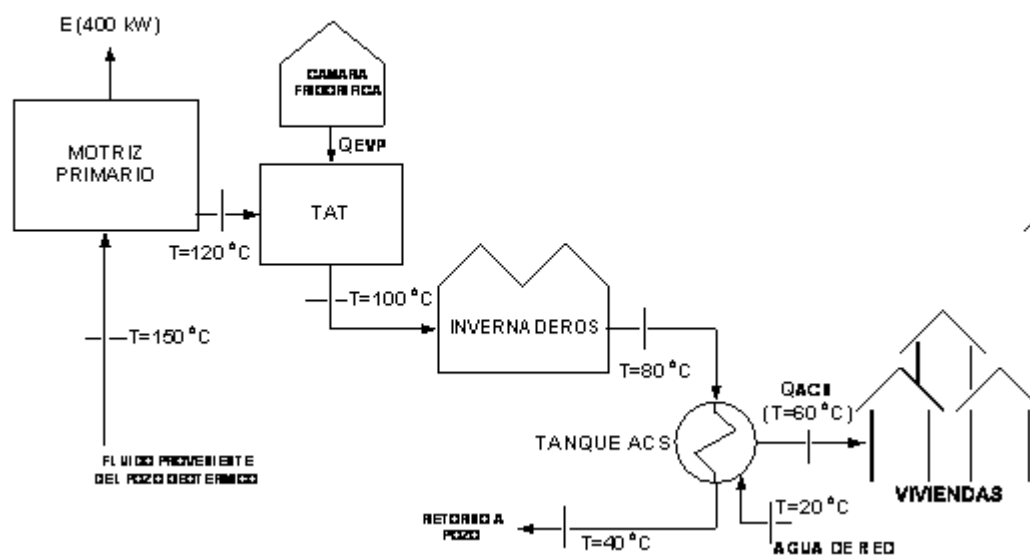


Figura 3.2: Esquema simplificado del sistema multiproducto.

3.1.1. Esquema simplificado y suposiciones

El fluido principal del sistema multiproducto es el fluido geotérmico que es considerado agua caliente, por lo que su presión debe ser mayor a la presión de saturación. Éste fluido cede calor en cuatro etapas durante su trayectoria en el sistema multiproducto. En la Figura 3.2, se puede apreciar un esquema simplificado de la integración en cascada de la energía geotérmica para generar electricidad, calor y frío.

Las suposiciones del sistema multiproducto se pueden resumir en las que cede calor el fluido geotérmico:

- **Etapa 1.** El agua proveniente del pozo geotérmico cede calor en el sistema motriz primario. El H_2O entra a 150°C y abandona el sistema a 115°C .
- **Etapa 2.** Una vez que abandona el sistema motriz primario, el agua entra a la TAT. La TAT se encarga de proporcionar una temperatura por debajo del punto de fusión del H_2O , suficiente para producir hielo (-13°C). El H_2O abandona la TAT a 100°C .
- **Etapa 3.** El agua entra a un conjunto de invernaderos a 100°C y los abandona a 80°C .
- **Etapa 4.** El agua entra a un tanque de almacenamiento donde cede calor al agua de la red que se encuentra a una temperatura de 20°C y la eleva a 60°C , esto para producir



Figura 3.3: Planta ORMAT de 300 kW instalada en el campo geotérmico de Simirao Michoacán.

agua caliente sanitaria. Finalmente el fluido de trabajo abandona el tanque a 40 °C y se regresa al pozo geotérmico.

3.1.2. Elección de la unidad de potencia

La unidad de potencia seleccionada (motriz primario), es un ORC por lo que funciona con energía geotérmica de media entalpia y con temperaturas del orden de los 120 °C. Aunque el ciclo funciona con dos fluidos de trabajo (binario), la parte de producción de potencia la comprende un ORC.

La Tabla A.1, muestra los fabricantes de ORC, por lo que se ha elegido una planta ORMAT que puede tener una potencia en el rango de 2 - 7.5 MW. Esta planta puede utilizar isopentano como fluido de trabajo en el circuito cerrado (ORC) y energía geotérmica como fuente de energía.

La Figura 3.3, muestra una planta ORMAT de 300 kWe o 400 kWe brutos, instalada en el campo geotérmico de Simirao Michoacán, esto para tener noción de las dimensiones de estas plantas.

La eficiencia que alcanzan estas máquinas son muy bajas, del orden del 9 - 21 %. La eficiencia máxima o inalcanzable de estos ciclos es la eficiencia de Carnot y depende de la temperatura de la fuente caliente y la fuente fría, un aproximado de esta eficiencia es alrededor del 30 %.

Por otra parte, para determinar donde se puede instalar la planta ORMAT de 300 kWe,

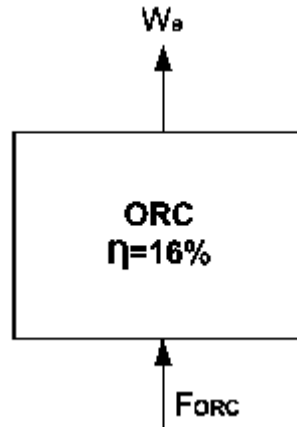


Figura 3.4: Esquema simplificado de la unidad de potencia.

es necesario conocer que potencial geotérmico requiere para que funcione. La Figura 3.4, muestra un bosquejo de la Planta ORMAT.

Una vez obtenido el potencial geotérmico se puede hacer uso de la Figura 1.15, que muestra el potencial estimado por regiones en México, y así observar en que región se puede instalar un ORC con las características anteriores.

3.1.3. Elección de la unidad enfriadora

En la unidad enfriadora o TAT, es un ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto que opera con el par de trabajo $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, esto porque con el par de trabajo $\text{Br-Li-H}_2\text{O}$ no se alcanzan temperaturas menores a $+5\text{ }^\circ\text{C}$ y el análisis es enfocado a una fábrica de producción de hielo, lo que requiere que la enfriadora proporcione temperaturas por debajo del punto de fusión del agua. La Tabla B.1, muestra algunos fabricantes de máquinas de absorción de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.

Por otra parte, la TAT es el segundo nivel de aprovechamiento (caso particular) del fluido geotérmico, por lo que la capacidad de enfriamiento depende de la cantidad de energía que contenga el fluido al abandonar el ORC e ingresar al generador del ciclo de refrigeración por absorción. La Figura 3.5, muestra un esquema de la máquina de refrigeración por absorción.

La unidad enfriadora seleccionada es del fabricante Colibrí bv, este fabricante produce máquinas de enfriamiento desde los 200 kW hasta la orden de los MW. Sin embargo para mayor información se puede hacer uso de la Tabla B.1, que muestra los fabricantes de máquinas de absorción $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.

La Figura 3.6, muestra una máquina de absorción de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ instalada en un super-

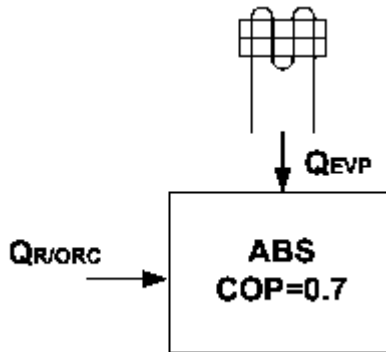


Figura 3.5: Esquema simplificado de la unidad enfriadora.



Figura 3.6: Máquina de absorción Colibrí bv, modelo ARP [44].

mercado Inglés, esta planta funciona mediante agua caliente a una temperatura de 120 °C.

Ahora en la Tabla 3.1, se muestra las características de diseño de la maquina ARP, que se muestra en la Figura 3.6.

3.1.3.1. Elección de la camara de enfriamiento

Una cámara frigorífica es el local construido con material aislante térmico, destinado a la conservación por medio del frío de productos. Existen requisitos para la construcción de cámaras, por ejemplo los pisos son construidos con material impermeable, antideslizante y no atacable por los ácidos grasos. Las paredes de las cámaras frigoríficas en su cara interior, estarán recubiertas con materiales de fácil limpieza, lisos, impermeables, resistentes a la

Tabla 3.1: Características de la máquina de absorción $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.

Parámetro	Característica
Modelo	ARP
Capacidad de refrigeración	500 kW
Temperatura de evaporación	-13 °C
Conducción de energía	960 kW, Agua caliente
Temperaturas de agua caliente	120/115°C
Consumo eléctrico	11 kW
Condensador	Agua fría 24°C/30°C
Absorbedor	Agua fría 24°C/30°C
Diseño	Largo (7m), ancho (3.5), alto (3.8m)
Año (comenzó)	2008

corrosión y de colores claros. El techo debe ser de construcción similar al de las paredes. El cielo raso deberá ser de material impermeable e incombustible y de fácil limpieza. En cuanto al material aislante térmico que se utilice deberá ser colocado en forma tal, que permita el cumplimiento de lo especificado para paredes y techos y no tener contacto con el ambiente interno o externo de la cámara frigorífica. Las puertas serán de hoja llena, provista de material aislante térmico [45].

Por lo anterior, se ha elegido diseñar una cámara de enfriamiento, en la cual se proponen unas dimensiones $L_1 \cdot L_2 \cdot L_3$ (15' x 20' x 10') que después serán confirmadas en la sección de resultados. El tipo de cámara seleccionada se muestra a continuación [45]:

La cámara frigorífica es conformada por techo, piso y muros los cuales están compuestos por diversos materiales. En el caso de los muros, éstos se conforman por cuatro materiales, ver Figura 3.8.

El piso de la cámara frigorífica también está conformado por cuatro capas de materiales. La Figura 3.9, muestra un bosquejo de la composición del piso.

El techo se conforma por cuatro materiales. A continuación se muestra un bosquejo de las capas que conforman el techo.

Anteriormente se mostraron los bosquejos de los materiales que conforman el piso, techo y muros de la cámara frigorífica. Ahora en la Tabla 3.2, se muestra los espesores y el tipo de material que los conforma.

3.1.4. Elección del uso térmico directo

En el uso térmico de la energía geotérmica el fluido geotérmico primeramente se aprovechará en un conjunto de invernaderos y donde se utilizará para climatización de los mismos,

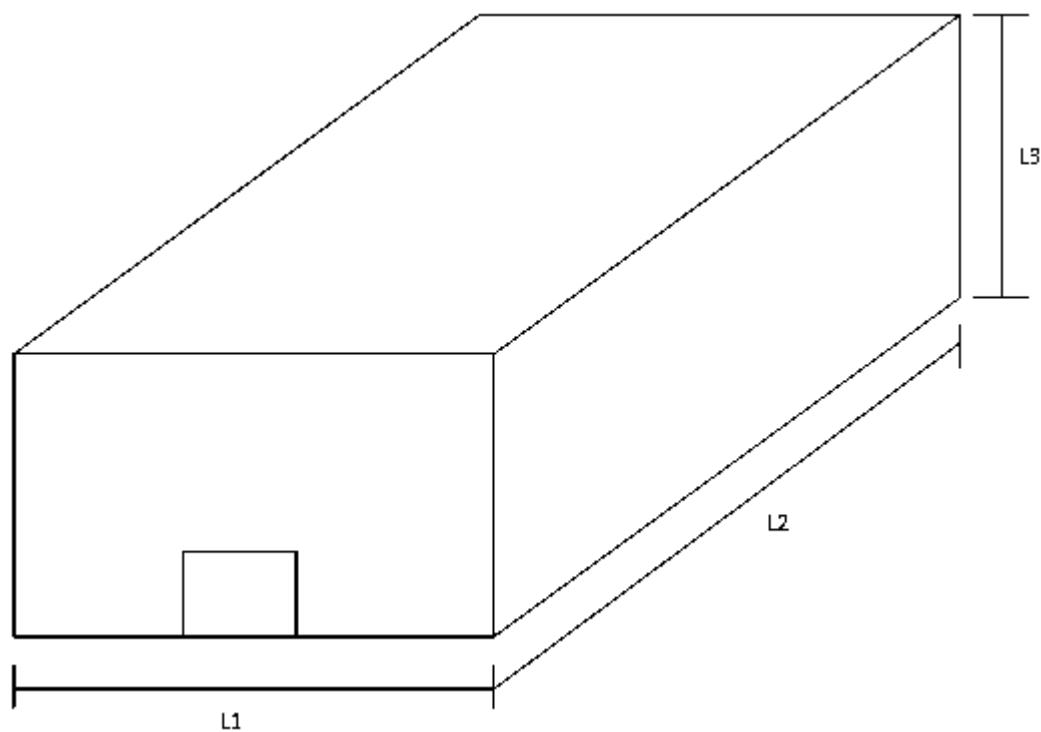


Figura 3.7: Elección de la cámara de enfriamiento.

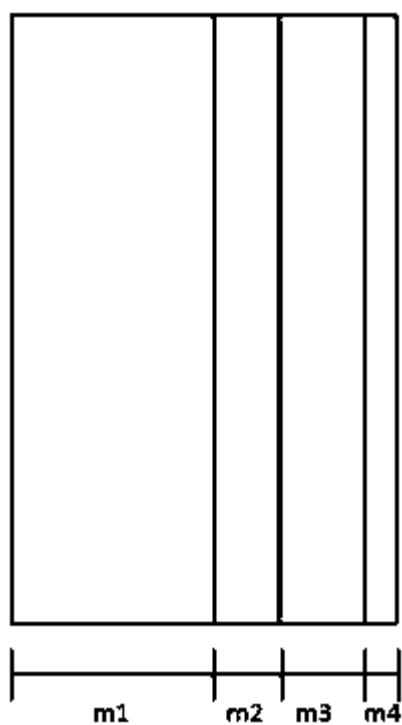


Figura 3.8: Materiales que conforman los muros de la cámara de enfriamiento.

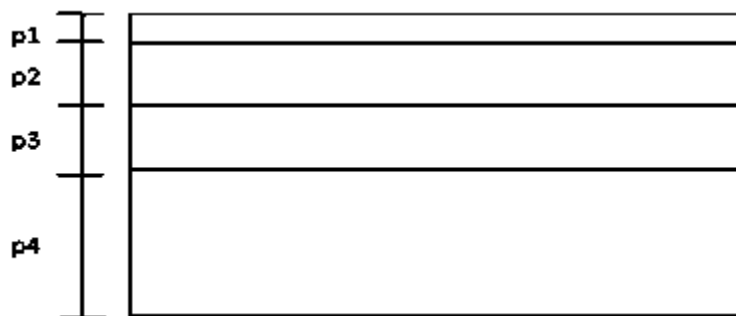


Figura 3.9: Materiales que conforman el piso de la cámara de enfriamiento.

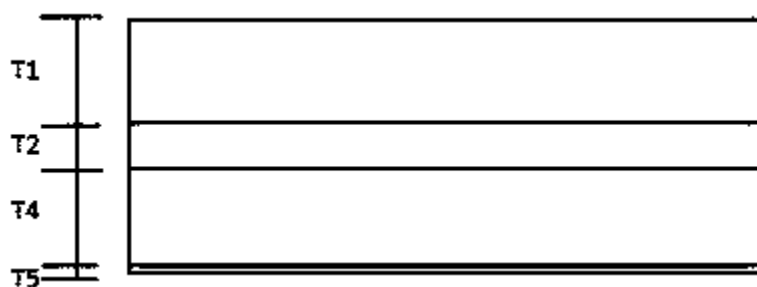


Figura 3.10: Materiales que conforman el techo de la cámara de enfriamiento.

Tabla 3.2: Tipos de materiales y espesores de la cámara.

Material	Tipo de material	Espesor (in)
m1	Ladrillo	11
m2	Emplasto cemento + arena	0.5
m3	Corcho granulado	4
m4	Acero inoxidable	0.125
p1	mosaico	0.5
p2	Concreto arena/grava	2
p3	Espuma rígida	2
p4	concreto	4
T1	Concreto	3
T2	Emplasto cemento + arena	0.5
T3	Fibra de vidrio	4
T4	Acero inoxidable	0.125



Figura 3.11: Aprovechamiento de la energía geotérmica en el invernadero.

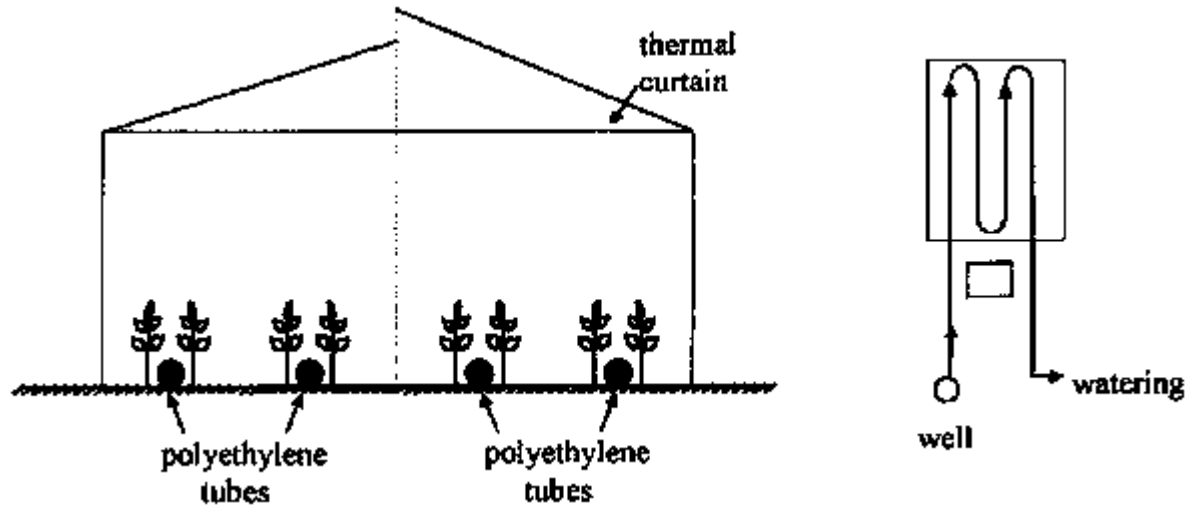


Figura 3.12: Calefacción en invernaderos mediante suelo radiante [46].

y finalmente el fluido geotérmico cederá energía que aprovechará para la producción de agua caliente sanitaria.

3.1.4.1. Invernadero

En el conjunto de invernaderos el calor del fluido geotérmico se utiliza para climatizar el ambiente y así obtener una mejor producción u obtener productos que no son de temporada.

El aprovechamiento de la energía en el invernadero se realiza después de que el fluido geotérmico cede parte de su energía en la TAT. La Figura 3.11, muestra el aprovechamiento de la energía geotérmica en el invernadero.

La tecnología seleccionada para los invernaderos es una tubería enterrada en el piso (suelo radiante). Se ha elegido esta tecnología debido a que el fluido geotérmico pasará por las tuberías en los suelos de los invernaderos y por lo tanto cederá calor al suelo y posteriormente al aire interior de los invernaderos. La Figura 3.3, muestra un ejemplo de esta calefacción.

Como se aprecia en la figura, el fluido caliente (geotérmico) pasa por el interior de los tubos



Figura 3.13: Invernadero tipo bativenital [47].

y este cede parte de su energía al suelo radiante del invernadero que a la vez brinda parte de su energía al aire del interior del invernadero. El aire debido a su cambio de temperatura se hace menos denso y por lo tanto abandona el aire por la parte superior de los invernaderos, debido a este proceso se han eligió para el análisis los invernaderos bativenitales, ver Figura C.3.

En este tipo de invernaderos el aire entra por los costados y los abandona por la parte superior, por lo que la calefacción por suelo radiante es una buena opción. Por otra parte, para una adecuada calefacción las dimensiones del invernadero juegan un papel importante en el comportamiento de la temperatura del aire en el interior. Esto se debe a que mientras mayores sean las dimensiones de un invernadero se requiere una mayor cantidad de energía para brindarles calefacción. En la Figura C.3, se puede apreciar un bosquejo de un conjunto de invernaderos y algunas dimensiones características.

Las dimensiones influyen en el comportamiento de la temperatura en el interior del invernadero. Sin embargo los fabricantes cuentan con una gran variedad de modelos de diferentes dimensiones o en su defecto proceden a fabricar el producto con las características que el cliente requiera. Por otra parte, las dimensiones que se requieren en el invernadero analizado en esta investigación se muestran en la sección de resultados.

Finalmente, existen otras tecnologías que pueden ser aplicadas para la calefacción de invernaderos, como es el caso del aerotermo (Ver, Apéndice C.3). En este apéndice también se aprecian los fundamentos de construcción para invernaderos.

3.1.4.2. ACS

La producción de ACS, es el último nivel térmico en el que cede calor el fluido geotérmico. El fluido, una vez que abandona los invernaderos se envía a un tanque de almacenamiento.

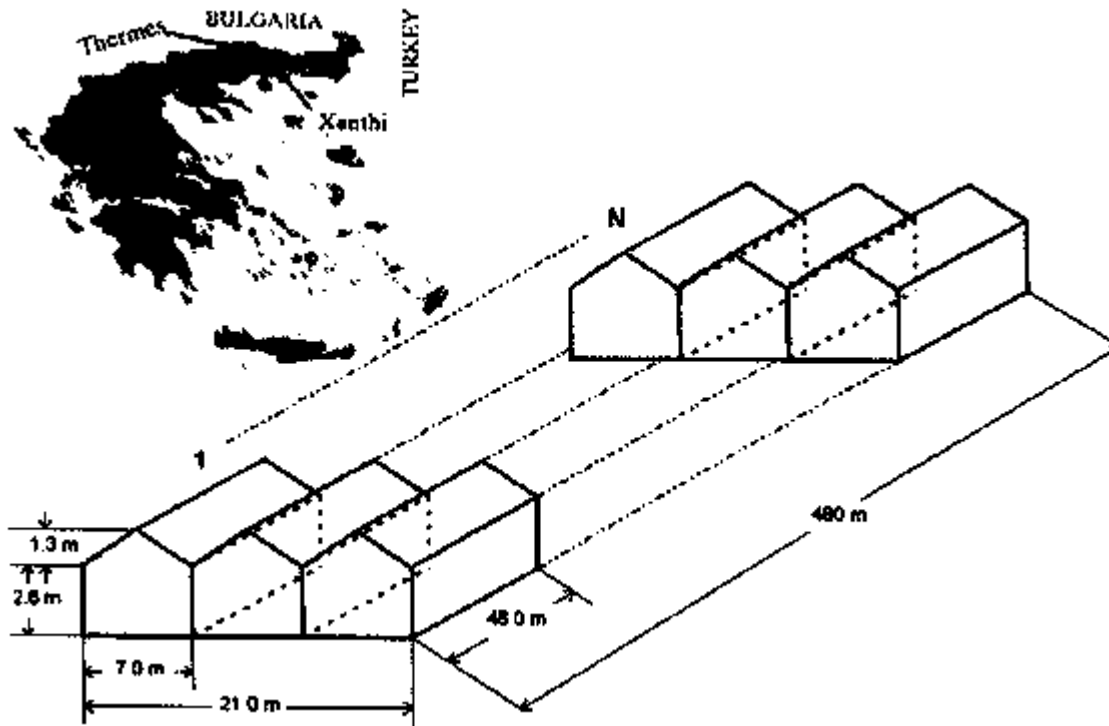


Figura 3.14: Dimensiones de algunos conjuntos de invernaderos [48].

Para una correcta selección del equipo a utilizar se han de tener en cuenta las características que se presentan a continuación [49]:

- Todos los sistemas, equipos y componentes, se diseñarán para poder efectuar y soportar tratamientos de choque térmico a una temperatura de 70 °C. El sistema de calentamiento debe ser capaz de elevar la temperatura del agua hasta 70 °C o más para su desinfección.
- Se debe calcular la instalación de forma que la temperatura del agua permanezca en todo punto de la instalación por encima de 50 °C. Para ello es necesario aislar térmicamente equipos, aparatos y tuberías.

El parámetro importante en la selección de esta etapa de la cascada que proporciona ACS a casas habitación es el volumen del tanque de almacenamiento (ver, sección de resultados), éste debe de ser apto para proporcionar agua caliente a un número determinado de viviendas. En este tanque de almacenamiento el fluido cede calor al agua de la red que a su vez es almacenada en el tanque y posteriormente se envía a un conjunto de viviendas como ACS. La Figura , muestra el esquema de la producción de ACS para un conjunto de viviendas mediante energía geotérmica.

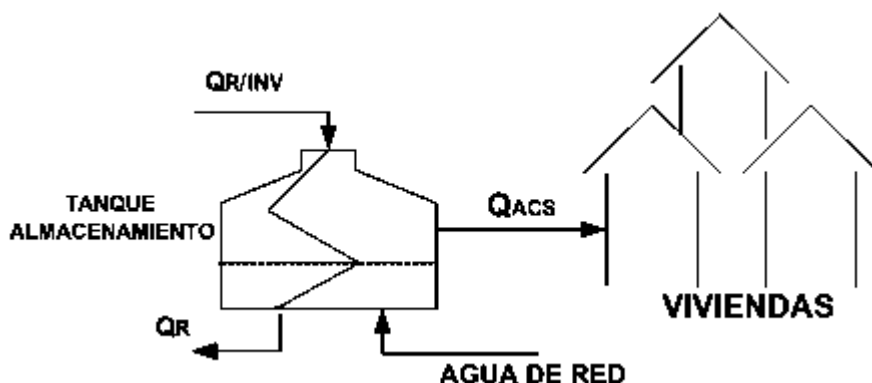


Figura 3.15: Esquema de la producción de ACS.

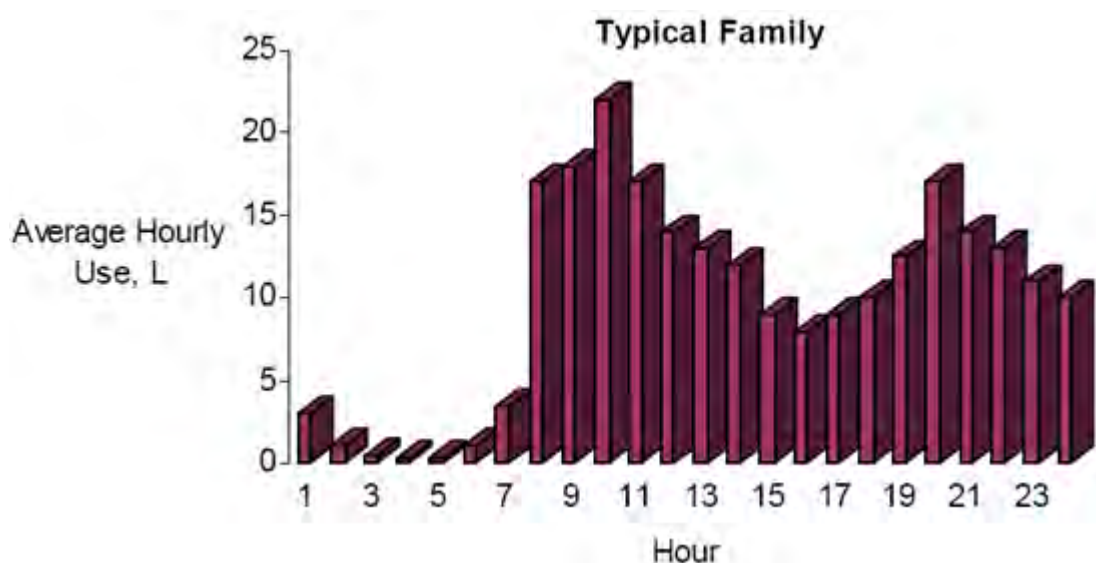
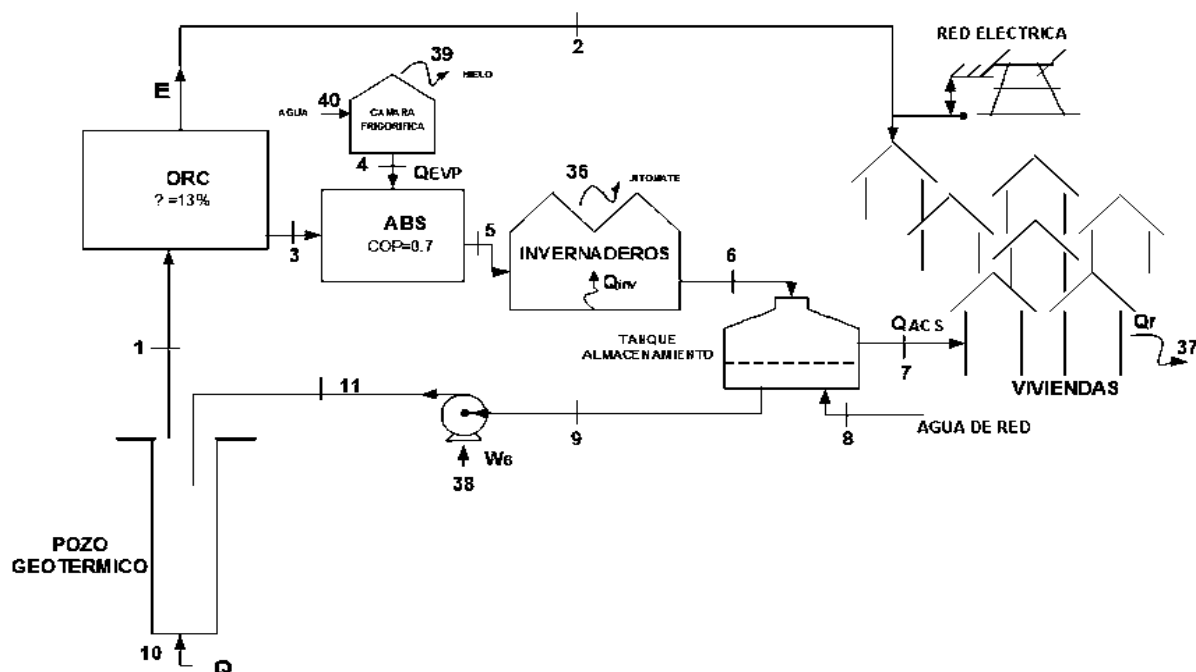


Figura 3.16: Perfil típico de consumo agua caliente de una vivienda [50].

Por lo anterior, es necesario conocer la demanda de agua caliente de casas habitación, para ello se puede hacer uso de las gráficas del comportamiento del consumo de agua caliente en el transcurso del día para viviendas (ver Figura 3.16), esto para conocer la variación del consumo de energía y por lo tanto satisfacer los picos de demanda de energía.

Otros comportamientos sobre la demanda de agua caliente en casas habitación se pueden encontrar en [51] y [52].

Finalmente, una vez que fluido cede su energía en el tanque de almacenamiento que es la última etapa de la cascada, éste es regresado al pozo geotérmico, donde se hace recircular con una bomba y vuelve a obtener de nuevo energía y por consiguiente comenzar el ciclo nuevamente.



3.2. Diseño básico del sistema para uso en cascada de la energía geotérmica

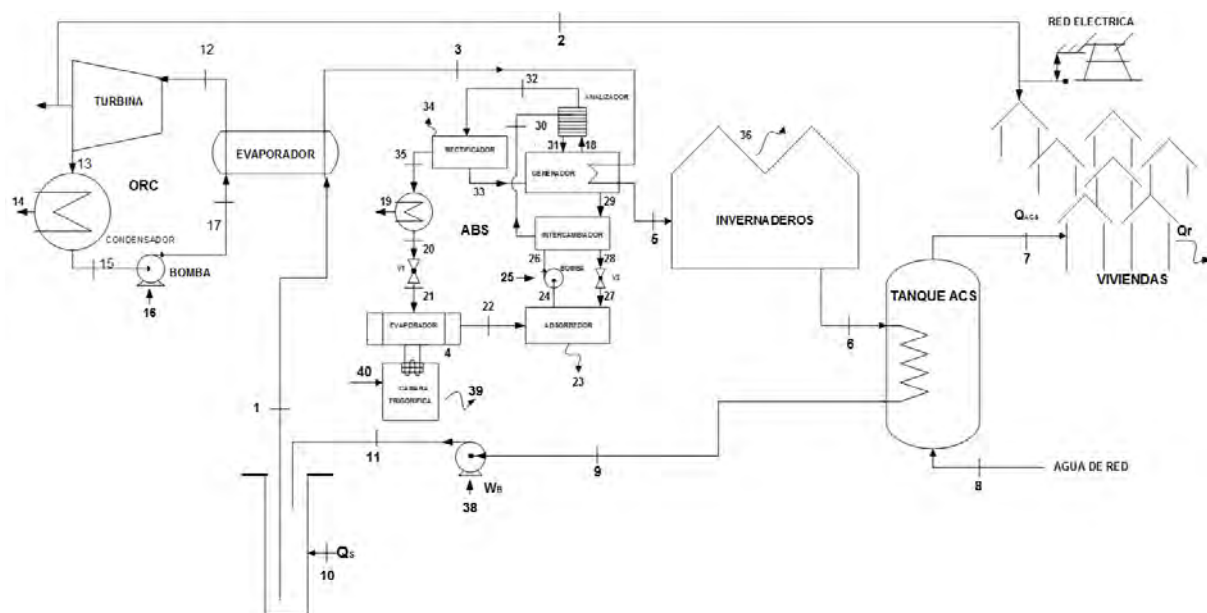


Figura 3.18: Diagrama del sistema en cascada desglosado.

3.2.1. Dimensiones preliminares y parámetros básicos del sistema

Las dimensiones preliminares del sistema pueden ser muy variables, esto debido a que las tecnologías principales del sistema en cascada requieren de otros equipos auxiliares para lograr su producto. Entre los equipos de mayores dimensiones se encuentran las torres de enfriamiento del ciclo ORC y del ciclo de refrigeración por absorción. Sin embargo, para tener una idea de las dimensiones de los sistemas, estas se pueden apreciar en las figuras 3.3 y 3.6.

Entre la máquina de absorción y el ciclo ORC abarcan una área aproximada de 35 m², pero como se mencionó anteriormente las dimensiones del sistema se incrementan cuando se contemplan los equipos auxiliares.

Por otra parte las tecnologías para los invernaderos son intercambiadores de calor y puede variar las dimensiones del sistema si se contempla la superficie total de los invernaderos, esto al igual que para el ACS.

3.2.2. Datos del pozo geotérmico

El pozo geotérmico es el encargado de suministrar la energía que requiere el sistema multiproducto para generar la electricidad, el calor y el frío. Este pozo tiene una característica diferente a los pozos geotérmicos convencionales, el pozo está obstruido a una cierta profun-

didad lo que hace posible reinyectar el agua en el mismo pozo lo que hace que la trayectoria del fluido geotérmico se realice en un circuito cerrado.

El fenómeno que se presenta en el pozo geotérmico es que el fluido una vez que ha cedido gran parte de su energía es reinyectado en el pozo geotérmico y conforme va descendiendo el fluido en el pozo este a su vez incrementa su temperatura, una vez que el fluido alcanza la profundidad máxima del pozo, éste alcanza su máxima temperatura, misma que es suficiente para que el sistema funcione y comience nuevamente el ciclo en el sistema.

En Simirao Michoacán, existe un pozo con características similares al propuesto en el sistema multiproducto. En éste pozo existe una obstrucción a los 550 m de profundidad aproximadamente. El pozo cuenta con tubería los primeros 200 m y el resto no cuenta con tubería, en este tipo de pozos la energía la transfiere generalmente la roca seca caliente al fluido, y la temperatura se incrementa conforme aumenta la profundidad.

Debido a la semejanza existen entre el pozo propuesto y el de Z-03 de Simirao Michoacán se tomaron los datos de este para conocer las prestaciones del sistema multiproducto. En La Figura 1.17, se han mostrado algunos datos del pozo geotérmico. Ahora en la Figura 3.19, se pueden apreciar algunos datos complementarios del pozo Z-03.

3.3. Análisis energético del sistema en cascada para generación de electricidad, calor y frío

El análisis energético del sistema en cascada permite conocer de una forma conceptual las prestaciones del sistema, es decir, la cantidad de energía eléctrica que se produce, la capacidad de enfriamiento y la cantidad de calor que se puede utilizar de forma directa.

Ciclo ORC

El ciclo ORMAT propuesto puede producir una potencia bruta de 400 kWe y la eficiencia de un ciclo de este tipo oscila alrededor de un 10 %, por lo que con esos datos se puede determinar el potencial geotérmico que requiere la planta ORMAT para operar. Una vez conocido el potencial geotérmico requerido se puede utilizar la Figura 1.15, ésta muestra las estimaciones de potenciales geotérmicos para México. Mediante la Ecuación 3.1, se puede obtener el potencial geotérmico que requiere la planta ORMAT de 400 kWe.

$$W_e = \eta_{ORC} Q_{ORC} \quad (3.1)$$

Ciclo de absorción

3.3. Análisis energético del sistema en cascada para generación de electricidad, calor y frío

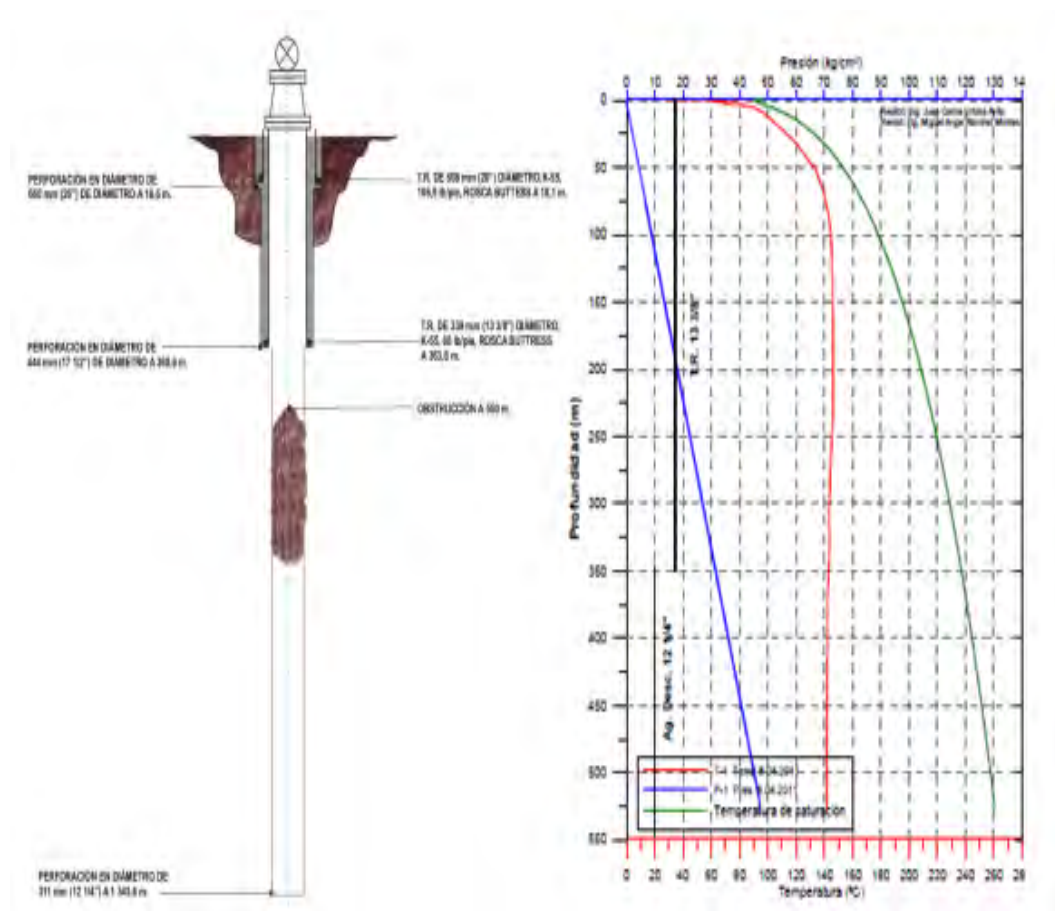


Figura 3.19: Esquema del pozo, perfiles de temperaturas y presiones en función de la profundidad.

La finalidad del ciclo de refrigeración por absorción en el sistema multiproducto es producir frío (hielo), lo cual lo consigue mediante el evaporador, pero para producirlo requiere de energía térmica en el generador. A continuación, se muestran cómo se evalúa la energía que requiere el ciclo y cuanta energía puede convertir en frío.

- Calor suministrado al ciclo:

$$Q_{GEN} = \dot{m}_3 C_p \Delta T_{GEN} \quad (3.2)$$

- Calor absorbido por el ciclo:

$$Q_{EVP} = Q_{GEN} COP \quad (3.3)$$

Invernaderos

En el conjunto de invernaderos, el fluido geotérmico cede parte de su energía mediante un intercambiador de calor que funciona como calefactor. La energía que se suministra en los invernaderos se puede conocer mediante la Ecuación 3.4:

- Calor suministrado:

$$Q_{INV} = \dot{m}_5 C_p \Delta T_{INV} \quad (3.4)$$

Viviendas ACS

La producción de ACS mediante el recuso geotérmico se lleva a cabo en un tanque de almacenamiento. El tanque es de contacto indirecto debido a que no se mezcla el agua de la red y el fluido geotérmico. El calor por unidad de masa que requiere la red de agua potable para producir ACS y el calor que puede ser cedido por el fluido geotérmico se evalúan de la siguiente manera:

- Calor agregado al agua de la red:

$$Q_{ACS} = \dot{m}_6 C_p \Delta T \quad (3.5)$$

- Calor requerido por el agua de la red:

$$Q_{RACS} = C_p \Delta T \quad (3.6)$$

Bomba del ciclo

La bomba es la encargada de recircular el fluido geotérmico del sistema, ésta inyecta el fluido en el pozo geotérmico y debido a la presión que le suministra al fluido los hace fluir

nuevamente por toda la cascada. La potencia de la bomba se determina mediante la Ecuación 3.7:

$$W_B = v_9 \dot{m}_9 (P_{11} - P_9) \quad (3.7)$$

Pozo geotérmico

El pozo geotérmico es el encargado de suministrar la energía que requiere el ciclo para producir la electricidad el calor y el frío. El calor suministrado por el pozo puede ser evaluado mediante la Ecuación 3.8:

- Calor aportado:

$$Q_{POZO} = \dot{m}_{11} C_p \Delta T \quad (3.8)$$

3.4. Análisis termodinámico del sistema

Mediante el análisis termodinámico del sistema multiproducto, se puede determinar los flujos energéticos de cada corriente del sistema, así como la energía disponible de cada corriente o flujos exergéticos. La finalidad de este análisis es conocer con mayor exactitud cuanta energía se puede convertir a electricidad, calor y frío.

Para un análisis completo del sistema es necesario desglosarlo, es decir, los balances de masa y energía se obtienen analizando un volumen de control de cada equipo. Las ecuaciones empleadas para la solución del sistema son; el balance de masa, balance de energía y el balance de exergía.

El balance de masa del sistema multiproducto se puede determinar mediante la Ecuación 3.9.

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum_e \dot{m} - \sum_s \dot{m} \quad (3.9)$$

En el caso de la evaluación de los flujos de calor y potencias del ciclo se usa el primer principio de la termodinámica, Ecuación 3.10.

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_s \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (3.10)$$

3.4.1. Modelo termodinámico del ciclo ORC

Para el análisis termodinámico se utilizan las ecuaciones 3.9, 3.10 y 3.67, éstas son aplicadas a cada equipo que conforma el ciclo ORC. A continuación se muestra el balance de energía y materia para cada equipo:

- Turbina de vapor (TV):

$$W_{e(2)} = \dot{m}_{12}h_{12} - \dot{m}_{12}h_{12} \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (3.12)$$

- Condensador:

$$Q_{CON(14)} = \dot{m}_{13}h_{13} - \dot{m}_{15}h_{15} \quad (3.13)$$

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{13} \quad (3.14)$$

- Bomba:

$$W_{B(16)} = \dot{m}_{17}h_{17} - \dot{m}_{15}h_{15} \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{17} \quad (3.16)$$

- Evaporador:

$$\dot{m}_1h_1 + \dot{m}_{17}h_{17} = \dot{m}_2h_2 + \dot{m}_9h_9 \quad (3.17)$$

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_3}{T_1 - T_{17}} \quad (3.18)$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{17} \quad (3.19)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_3 \quad (3.20)$$

3.4.2. Modelo termodinámico del ciclo de absorción

Para el análisis termodinámico del ciclo de refrigeración por absorción se utilizan también las ecuaciones 3.9, 3.10 y 3.67. Solamente que en este ciclo interfiere otra propiedad a la que se la llama la fracción de masa.

A continuación se muestran los balances de energía, materia y fracción de masa de cada equipo del ciclo de refrigeración por absorción:

- Absorbedor:

$$Q_{AB(23)} = \dot{m}_{27}h_{27} + \dot{m}_{22}h_{22} - \dot{m}_{24}h_{24} \quad (3.21)$$

$$\dot{m}_{27} + \dot{m}_{22} = \dot{m}_{24} \quad (3.22)$$

- Generador-analizador:

$$Q_{GEN} = \dot{m}_{30}h_{30} + \dot{m}_{33}h_{33} - \dot{m}_{29}h_{29} - \dot{m}_{32}h_{32} \quad (3.23)$$

$$\dot{m}_{30} + \dot{m}_{33} = \dot{m}_{29} + \dot{m}_{32} \quad (3.24)$$

$$\dot{m}_{30}x_{30} + \dot{m}_{33}x_{33} = \dot{m}_{29}x_{29} + \dot{m}_{32}x_{32} \quad (3.25)$$

- Condensador:

$$Q_{CON(19)} = \dot{m}_{35}h_{35} + \dot{m}_{20}h_{20} \quad (3.26)$$

$$\dot{m}_{35} = \dot{m}_{20} \quad (3.27)$$

- Válvula (V1):

$$h_{21} = h_{20} \quad (3.28)$$

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{20} \quad (3.29)$$

- Evaporador:

$$Q_{EVP(4)} = \dot{m}_{22}h_{22} - \dot{m}_{21}h_{21} \quad (3.30)$$

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22} \quad (3.31)$$

■ Bomba:

$$W_{B(25)} = \dot{m}_{26}h_{26} - \dot{m}_{24}h_{24} \quad (3.32)$$

$$W_{B(25)} = \frac{(P_{alta} - P_{baja})}{\eta_B} \dot{m}_{24}v_{24} \quad (3.33)$$

$$\dot{m}_{24} = \dot{m}_{26} \quad (3.34)$$

■ Intercambiador de calor:

$$\dot{m}_{26}h_{26} + \dot{m}_{29}h_{29} = \dot{m}_{28}h_{28} + \dot{m}_{30}h_{30} \quad (3.35)$$

$$f = \frac{x_{29}}{x_{29} - x_{28}} \quad (3.36)$$

$$\varepsilon = \frac{T_{29} - T_{28}}{T_{29} - T_{26}} \quad (3.37)$$

$$\dot{m}_{29} = \dot{m}_{28} \quad (3.38)$$

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{26} \quad (3.39)$$

■ Válvula (V2):

$$h_{28} = h_{27} \quad (3.40)$$

$$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{27} \quad (3.41)$$

Una vez determinado los flujos de calor y trabajo que interfieren en el ciclo de absorción, puede ser determinado el coeficiente del sistema de refrigeración mediante la Ecuación 3.42.

$$COP = \frac{Q_{EVP}}{Q_{GEN} + W_B} \quad (3.42)$$

3.4.2.1. Análisis de la cámara frigorífica

Un aspecto importante que no influye directamente con el análisis termodinámico del ciclo de refrigeración por absorción pero si en el producto final del ciclo de absorción es el análisis de la cámara de enfriamiento, en la cual el objetivo es producir hielo en base a la potencia frigorífica de la máquina de absorción. El procedimiento para el cálculo de un sistema de acondicionamiento y control de temperatura de una cámara frigorífica, es ejecutar un análisis de todos aquellos elementos que pueden originar elevación o descenso de la temperatura interior. El análisis de estos elementos se le llama balance térmico, el cual debe efectuarse en la condiciones climatológicas más desfavorables y considerando únicamente los conceptos que ocurren en forma simultánea. Los conceptos que se consideran para efectos del balance térmico a continuación se describen:

Ganancias de calor a través de paredes, techos y pisos

A veces se le llama carga de fuga, es una medición del calor que fluye por conducción a través de las paredes del espacio refrigerado del exterior hacia el interior. La cantidad de calor transmitida en la unidad de tiempo a través de paredes de un espacio refrigerado es función de los factores cuya relación se expresa a través de la Ecuación 3.43:

$$Q = UA\Delta T \quad (3.43)$$

Donde el coeficiente global de transferencia de calor se define mediante:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_o}} \quad (3.44)$$

Para la Ecuación 3.44, se tiene que realizar los calculos para cada muro dependiendo de la orientación solar.

Ganancia de calor por infiltración de aire

Al abrirse la puerta de un espacio refrigerado, el aire caliente del exterior entra al espacio para remplazar al aire frío más denso, esto constituye una pérdida en el espacio refrigerado que se evalúa mediante la Ecuación 3.45.

$$Q_{CA} = V_i n F_{CA} \quad (3.45)$$

Carga de enfriamiento del producto

Para el cálculo de la carga de enfriamiento, en este caso hielo. Primeramente se lleva el agua hasta la temperatura de fusión y posteriormente se lleva el hielo hasta la temperatura

deseada en este caso -5°C . La expresión que nos permite calcular esta cantidad de energía a remover del agua es:

$$Q = \dot{m}_{hielo} (C_{Pagua} \Delta T_{>0^{\circ}\text{C}} + C_{latente} + C_{Phielo} \Delta T_{<0^{\circ}\text{C}}) \quad (3.46)$$

Ganancias de calor por lámparas, motores y personas

En esta etapa se consideraron 10 lámparas de 100 W y 10 personas, no se consideraron motores. Como se aprecia el número de personas y de lampas es demasiado para las dimensiones propuestas en la cámara. Sin embargo, esto es porque es un análisis generalizado y el tener mayor carga de ganancia de calor por personas y lámparas funciona como un factor de seguridad para la producción de hielo.

3.4.3. Modelo de uso del calor en invernadero

En el modelo termodinámico del invernadero se utilizan también las ecuaciones de masa, energía (primer principio de la termodinámica) y exergía. Para calcular el flujo de calor en el intercambiador de calor (tubos enterrados) se utiliza la Ecuación 3.4. Mientras que para el balance de masa se tiene la Ecuación 3.47:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (3.47)$$

Básicamente mediante las ecuaciones del análisis energético se determina el flujo de calor que ingresa al conjunto de invernaderos.

Sin embargo, es de gran importancia conocer si el calor que se tienen destinado para el conjunto de invernaderos es suficiente para su calefacción, por lo que se tienen que calcular las pérdidas de energía. La pérdidas de calor durante la noche/día se lleva a cabo a través del material de la cubierta, el suelo y como resultado de la entrada de aire frío en el invernadero.

La pérdida de calor resultante de la conductividad térmica del material de la cubierta es de la forma siguiente:

$$Q_1 = K_{CON} A_{CON} \Delta T \quad (3.48)$$

Donde ΔT es la diferencia de temperatura entre el interior y exterior del invernadero, A es el área total de superficie del material incluyendo el techo y los lados. El área de la superficie total del material de la cubierta se incrementa en un 18.8 % debido ondulaciones en el material. En caso de fuertes vientos podría aumentar hasta en un 40 %, con un aumento relativo de la pérdida de calor.

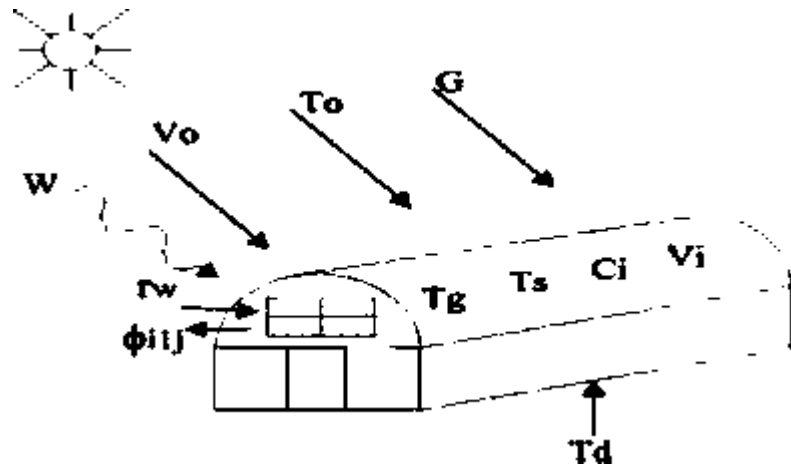


Figura 3.20: Variables del invernadero [53].

Las pérdidas de calor debidas a la conductividad térmica del suelo son expresadas como:

$$Q_2 = K_{soil} A_{soil} \Delta T \quad (3.49)$$

La Ecuación 3.50 describe la pérdida de calor causada por la entrada de aire frío en el invernadero:

$$Q_3 = CVn\Delta T \quad (3.50)$$

En la pérdida de calor causada por el aire frío influyen; el calor específico del aire, el volumen del invernadero, el número de cambios por hora y la diferencia de temperaturas interior y exterior.

En presencia de viento fuerte, la pérdida se incrementa por encima de aproximadamente 34.5 %.

Por otra parte, la pérdida de calor por radiación a través del material de la cubierta es estimada aproximadamente entre el 20 ± 25 % de la pérdida total [48].

Otro aspecto a considerar y quizás el más importante para el producto que se quiera obtener en el invernadero es el comportamiento de la temperatura del aire en el interior. Dicha temperatura es función de varias variables, estas se muestran en la Figura 3.20.

Para la temperatura del aire dentro del invernadero se considera el efecto debido a las siguientes influencias: el intercambio de calor entre el exterior y el interior del invernadero, entre el suelo y el aire dentro del invernadero, entre el aire interior y la tubería del sistema de calentamiento, entre el aire interior y el techo; la influencia de la radiación solar; la pérdida de calor por transpiración de la planta; la ganancia de calor por la condensación del vapor

de agua en el techo [53]. La correspondiente ecuación es:

$$C_g \frac{dT_g}{dt} = K_v (T_0 - T_g) + \alpha (T_p - T_g) + K_r (T_0 - T_g) + K_s (T_s - T_g) + Z\eta G - \lambda E + \frac{\lambda}{\varepsilon + 1} M_c \quad (3.51)$$

Donde:

$$E = W_L \frac{qSn\eta G + r\rho C_p D_g g_b}{\lambda \left(S + \gamma \left(1 + \frac{g_b}{g} \right) \right)} \quad (3.52)$$

$$D_g = a_1 e^{\frac{a_2 T_g}{a_3 + T_3}} - \Lambda (T_g + T_0) V_i \quad (3.53)$$

$$s = s_1 T_g^2 + s_2 T_g + s_3 \quad (3.54)$$

$$g = g_1 \left(1 - g_2 e^{-g_3 G} \right) e^{-g_4 C_i} \quad (3.55)$$

$$\lambda = L_1 - L_2 T_g \quad (3.56)$$

$$K_v = M_{air} C_p \phi_v \quad (3.57)$$

$$M_c = \left\{ \begin{array}{ll} m_1 \|T_g - T_c\|^{m_2} (W_g - W_c^*) & W_g > W_c^* \\ 0 & W_g \leq W_c^* \end{array} \right\} \quad (3.58)$$

$$W_c^* = \frac{\omega P_c^*}{P_{atm} - P_c^*} \quad (3.59)$$

$$P_c^* = a_1 e^{\frac{a_2 T_c}{a_3 + T_c}} \quad (3.60)$$

$$T_c = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1} T_0 + \frac{1}{\varepsilon} T_g \quad (3.61)$$

$$W_g = \frac{\omega P_g}{P_{atm} - P_g} \quad (3.62)$$

$$P_g = \Lambda (T_g + T_0) V_i \quad (3.63)$$

Hay que hacer notar, en ésta Ecuación 3.51, la densidad del aire es considerada constante. A demás de considerar solamente para el modelado los cuatro primeros terminos de la ecuacion ya que la finalidad de esta parte del estudio es analizar el comportamiento de la temperatura del invernadero agregando un flujo de calor como constante. Los términos restantes de la Ecuación 3.51 se ha despreciado debido a que es un análisis muy generalizado y la finalidad de este trabajo es determinar las cantidades de calor, electricidad y frio que produce el sistema. Por otra parte, para mayor información de los valores y constantes que influyen en la Ecuación 3.51 consultar [53].

3.4.4. Modelos para el uso de ACS

Para el modelado termodinámico del ACS se utilizan se utiliza las ecuaciones 3.5 y 3.6. Primeramente en este modelado se tiene que realizar un análisis en el tanque de almacenamiento para conocer la producción de ACS y posteriormente realizar un análisis en las casas-habitación para conocer cuanta ACS es realmente utilizada. Los balance de masa para el tanque son los siguientes:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (3.64)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_9 \quad (3.65)$$

En esta etapa de análisis el flujo de calor que ingresa al tanque de almacenamiento es determinado mediante el análisis energético. La finalidad del análisis del tanque de almacenamiento es determinar la temperatura del agua que se envía a las casa habitación para conocer si satisface la demanda térmica.

El modelado del sistema de almacenamiento térmico conlleva tres factores básicos. El primero es referente al calor que fluye asociado al agua caliente que habrá de almacenarse, el segundo es el calor perdido por convección y finalmente el calor que puede ser suministrado al tanque para mantener la temperatura estable al interior del tanque. Por otro lado, cabe recordar que el modelo depende del tiempo de almacenamiento y la demanda horaria. Esto se expresa en el siguiente modelo.

$$\rho V C_p \frac{dT}{dt} = Q_i + \rho G C_p (T - T_{in}) - Q_l \quad (3.66)$$

Para el caso de estudio la forma de resolver el modelo, es por el método de diferencias finitas, siendo este método fácil de programar debido a la simpleza del modelo resultante [54].

3.5. Análisis exergetico del sistema en cascada

Un sistema al ponerse en equilibrio con su entorno puede desarrollar trabajo, si definimos un ambiente de referencia para éste, la exergía de un sistema es el máximo trabajo que puede obtenerse de la interacción mutua al ponerlo en equilibrio con el ambiente de referencia [55], [56] y [57].

- El ambiente de referencia no cambia sus propiedades intensivas al ponerse el sistema en equilibrio con el, es un concepto más ideal que el entorno inmediato del sistema.
- El ambiente se define como un sistema simple compresible con dimensiones enormes y a una presión P_0 y temperatura T_0 .
- El estado muerto de un sistema es aquel en el que no puede interaccionar con el ambiente de referencia, su energía cinética y potencial son cero respecto del ambiente de referencia.

Por lo que para el análisis exergetico se tiene la Ecuación 3.67:

$$\frac{dB_{BV}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_j - \left[\dot{W}_{VC} - p_0 \left(\frac{dV_{VC}}{dt}\right)\right] + \sum_e \dot{m}b_f - \sum_s \dot{m}b_f - \dot{B}_{dest} \quad (3.67)$$

Donde:

$$b_f = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (3.68)$$

$$B = \dot{m}b_f \quad (3.69)$$

Para la determinación de la exergía de flujos de calor, se aplica la Ecuación 3.70:

$$B = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (3.70)$$

La Ecuación 3.68, es aplicable para corrientes y se le denomina exergía de flujo. Debido a que el fluido geotérmico en la cascada es considerado agua caliente, la Ecuación 3.68,

es aplicable pero no es lo adecuado. La metodología varía y los cambios de entalpía son sustituidos por la definición de C_P :

$$C_P = \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad (3.71)$$

Mientras que para los cambios de entropía los líquidos y sólidos pueden aproximarse como sustancias incompresibles dado que sus volúmenes específicos permanecen casi constantes durante un proceso. Entonces el cambio de entropía durante el proceso es determinado por:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C(T) \frac{dT}{T} \cong C_{prom} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (3.72)$$

Por lo anterior, la exergía específica de flujo para líquidos o sólidos puede definirse mediante:

$$b_{l,s} = C_P (T - T_0) - T_0 C_{prom} \ln \frac{T}{T_0} \quad (3.73)$$

Donde para la exergía total solo se tiene que realizar el producto del flujo de masa y la Ecuación 3.73.

3.5.1. Análisis exergético del ciclo ORC

Acontinuación, se muestran las destrucciones de exergía por componente del sistema multiproducto. Para la obtención de las exergías de flujo se pueden utilizar las ecuaciones 3.67 y 3.73.

Anteriormente se introdujo el concepto de exergía. Ahora se hará énfasis en la destrucción de exergía. Las irreversibilidades como la fricción, la transferencia de calor debida a una diferencia finita de temperaturas, la compresión o expansión sin cuasiequilibrio, siempre generan entropía y cualquier cosa que genera entropía destruye exergía [56]. Para el caso de los componentes del ORC se tienen:

- Turbina de vapor (TV):

$$B_{dest} = B_{12} - B_2 - B_{13} \quad (3.74)$$

- Condensador:

$$B_{dest} = B_{13} - B_{14} - B_{15} \quad (3.75)$$

- Bomba:

$$B_{dest} = B_{15} + B_{16} - B_{17} \quad (3.76)$$

- Evaporador:

$$B_{dest} = B_1 - B_{12} + B_{17} - B_3 \quad (3.77)$$

3.5.2. Análisis exergético del ciclo de absorción

En todo proceso energético existe destrucción de exergía. La exergía destruida es proporcional a la entropía generada. Para el ciclo de absorción se tiene:

- Absorbedor:

$$B_{dest} = B_{27} + B_{22} - B_{23} - B_{24} \quad (3.78)$$

- Generador-analizador:

$$B_{dest} = B_{30} + B_{33} - B_{32} - B_{29} \quad (3.79)$$

- Rectificador:

$$B_{dest} = B_{32} - B_{34} - B_{35} - B_{33} \quad (3.80)$$

- Condensador:

$$B_{dest} = B_{25} - B_{19} - B_{20} \quad (3.81)$$

- Valvula:

$$B_{dest} = B_{20} - B_{21} \quad (3.82)$$

- Evaporador:

$$B_{dest} = B_{21} + B_4 - B_{22} \quad (3.83)$$

- Bomba:

$$B_{dest} = B_{25} + B_{24} - B_{26} \quad (3.84)$$

- Intercambiador de calor:

$$B_{dest} = B_{26} + B_{29} - B_{28} - B_{30} \quad (3.85)$$

■ Válvula:

$$B_{dest} = B_{28} - B_{27} \quad (3.86)$$

En el análisis de la destrucción de exergía en esta etapa de la cascada se tiene que considerar el producto de la maquina de absorción. En terminos generales, el producto de esta máquina es destinado a la producción de hielo, por lo que se tiene que realizar el análisis de la destrucción de exergía en la camara frigorífica, donde se obtiene un producto (hielo) y se tienen dos recursos para producirlo agua a temperatura ambiente que ingresa a la cámara y la potencia frigorífica de la máquina de absorción:

$$B_{dest} = B_{40} - B_4 - B_{39} \quad (3.87)$$

3.5.3. Análisis exergético en el invernadero

Para el conjunto de invernaderos en la destrucción de exergía influye el producto del invernadero (tomate). O bien, el análisis se podría simplificar si el producto de los invernaderos se considera como el calor que sede el fluido geotermico en esta etapa de la cascada. La expresión matemática que define la evaluación de la destrucción de exergía en el invernadero es:

$$B_{dest} = B_5 - B_6 - B_{36} \quad (3.88)$$

Otro caso considerando es que el recurso que utilizan los tomates es la exergía del flujo de calor que se disipa en los invernaderos. Por lo que la destrucción de exergía se define mediante:

$$B_{dest} = B_{QINV} - B_{36} \quad (3.89)$$

3.5.4. Análisis exergético para el uso de ACS

Para el caso del ACS, se tiene que realizar el análisis del tanque de almacenamiento y el conjunto de viviendas. El tanque de almacenamiento es conciderado como un intercambiador de calor, donde la destrucción de exergía para este se define mediante la Ecuación 3.90:

$$B_{dest} = B_6 + B_8 - B_7 - B_9 \quad (3.90)$$

En el conjunto de viviendas se consumen parte de los productos del tanque de almacenamiento y del ciclo ORC. Por lo que, realizando la consideración de que el agua caliente que se produce en el tanque de almacenamiento es consumida en su totalidad por las viviendas, la destrucción de exergía se define como:

$$B_{dest} = B_7 - B_2 - B_{37} \quad (3.91)$$

Capítulo 4

ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DEL SISTEMA EN CASCADA

4.1. Estimación de costos de inversión y O&M

Además de ser energéticamente eficiente, un sistema multiproducto debe ser para fines prácticos económicamente viable con el propósito de que la inversión económica tenga éxito.

4.1.1. Estimación de Costos de Inversión

El costo de inversión, o también llamado costo de capital, costo inicial o primer costo, se compone por la adición de los costos del equipo, costos de instalación y los costos del proyecto que se relacionan con la ingeniería y gestión del sistema. Dentro de los costos de inversión más importantes en el sistema se tienen:

- Sistema motriz primario
- Dispositivos activados térmicamente (enfriadores, bombas de calor, etc.)
- Sistemas de recuperación y rechazo de calor
- Sistema de control
- Tuberías
- Cámara de enfriamiento
- Invernaderos

Cuadro 4.1: Datos para el modelo económico del ORC.

Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor
Tiempo de operación anual	TOP	h	7884
Tipo de cambio	TC	USD \$	13
Tasa de interés	i	%	10
Vida útil de la planta	N	años	20
Costo de O&M	$C_{O\&M}$	\$/kWh	0.065
Costo de mercado de electricidad	C_{ME}	\$/kWh	1.2

Para cada equipo o sistema, los costos son una función de diversas características, por ejemplo, en el elemento motriz primario los costos dependerán de la potencia eléctrica, la capacidad de poder utilizar combustibles alternativos, el voltaje del generador, el sistema de control de emisiones, los dispositivos de reducción de ruido, etc. En forma muy general, el costo de las plantas ORC varia de 3000 a 4000 USD/kW. Respecto de los sistemas de recuperación y rechazo de calor, los costos dependen del medio requerido (vapor, agua caliente, agua fría), calidad de la energía térmica, niveles de presión y temperatura requeridos y unidad de tratamiento de agua. En lo que se refiere a los invernaderos y cámara de enfriamiento, el costo está relacionado directamente con los materiales y las dimensiones.

Para el motriz primario ORC

El modelo económico del ciclo binario (ORC) se determina mediante un conjunto de expresiones necesarias para valorar la viabilidad económica, considerando desde los costos de adquisición de los equipos, combustibles necesarios, vida útil estimada, costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, así como la tasa de interés, para finalmente evaluar, al menos, el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de retorno, y con ello determinar la viabilidad económica de la planta, Ver Tabla 4.1.

Para el análisis se ha tomado en cuenta una planta que anteriormente estaba operando en Maguarichic, Chihuahua y posteriormente la planta fue donada por CFE a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Información proporcionada en un reporte técnico de esta unidad destaca el costo de algunos equipos en la Tabla 4.2 [58].

Para la Máquina de absorción $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, en general, los costos de inversión de las máquinas amoniaco-agua, se encuentran en el rango de 543.80 USD \$/kWf y 1360 USD \$/kWf. Mientras que para su complemento de la producción del hielo (cámara de enfriamiento) es de aproximadamente 600 USD \$/m³. Para el análisis de esta parte, es considerado que el agua que se convierte en hielo es adquirida en un costo determinado (0.08 USD \$/kW).

Cuadro 4.2: Costo de inversión ORC.

Equipos	Simbología	Costo (USD)
Planta de Energía	$\dot{Z}_{PE}$	\$ 900,000
Torre de enfriamiento	$\dot{Z}_{TE}$	\$ 60,000
Subestación eléctrica	$\dot{Z}_{SE}$	\$ 10,000
Sistema de bombeo	$\dot{Z}_{SB}$	\$ 40,000
Trabajos de construcción	$\dot{Z}_{TC}$	\$ 50,000
Isopentano	$\dot{Z}_{ISO}$	\$10,000

El costo de inversión de los invernaderos está dado por unidad de área ver Tabla C.2, y oscilan para invernaderos batimentales desde aproximadamente de USD \$ 20 a 50.

En el caso de la estimación del costo del tanque de almacenamiento de ACS se obtiene mediante la función:

$$Z_T = 1.1088x10^6 W_T^{0.75} \quad (4.1)$$

Donde interfiere el peso del tanque y depende del volumen a almacenar:

$$W_T = 2.71 + 0.0479V_T \quad (4.2)$$

En la Ecuación 4.2, V_T es el volumen del tanque en metros cúbicos y es una variable que cobra especial importancia ya que define el costo del tanque [54].

Para obtener el beneficio del tanque de ACS se hace la analogía con una caldera que utiliza gas natural y esta necesita proporcionar el flujo de agua caliente que proporciona el tanque a las casas. Por lo que el beneficio sera el costo por el gas natural que consuma. El costo del gas natural asignado para el analisis es de 0.2 USD \$/m³, estimado para la región centro de México.

Por otra parte, siendo fundamental en la elaboración de proyectos, que los inversionistas proveen de capital para la realización de este tipo de proyectos con la esperanza de que se les regrese lo que invirtieron. Por lo que se tiene que realizar una evaluación económica para informar si la inversión es viable o no [59]. Para dicha evaluación se definen una serie de parámetros económicos que se describen a continuación y en el transcurso del capítulo. Tomando los datos de la Tabla, el costo de inversión de equipos y tomando como referencia la planta ORC viene dado por esta ecuación:

$$Z_{Inv} = \sum \dot{Z}_{equipos} = \dot{Z}_{PE} + \dot{Z}_{TE} + \dot{Z}_{SE} + \dot{Z}_{SB} + \dot{Z}_{TC} + \dot{Z}_{Iso} \quad (4.3)$$

Para el costo se debe tener el costo total anualizado, tomando en cuenta una tasa de interés del 10 % y una vida útil de 20 años.

$$\dot{Z}_{an} = \dot{Z}_{in} \left(\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right) \quad (4.4)$$

Para saber el ingreso por venta de electricidad se requiere saber cuánta energía se generó al año, para esto se utiliza la Ecuación 4.4 y posteriormente el ingreso por venta de electricidad se llega a la Ecuación 4.6.

$$\dot{E}_{año} = \dot{W}_{net} \cdot TOP \quad (4.5)$$

$$I_{VE} = CU_{elec} \cdot \dot{E}_{año} \quad (4.6)$$

Los beneficios son bienes o servicios tangibles, generados por el proyecto, valorados a precio de mercado, que incrementan los ingresos del mismo, sea por aumento de la producción o reducción de los costos, o los dos. Lo que interesa en un proyecto es el beneficio neto siendo aquel que queda luego de retirar de los ingresos todos los egresos. El beneficio económico anual se obtiene con la Ecuación 4.7:

$$B_{an} = I_{VE} - (\dot{Z}_{an} + \dot{Z}_{O\&M}) \quad (4.7)$$

Otro parámetro que influye notablemente es el costo nivelado de electricidad ($LCoE$), éste representa el costo unitario constante (por kWh o MWh) de un flujo de pagos que tiene el mismo valor presente, se trata de una valoración económica del costo del sistema de generación de energía, incluyendo todos los costos a lo largo de su vida: la inversión inicial, las operaciones y el mantenimiento, el costo del combustible, el costo de capital. Es una herramienta industrial muy útil para comparar tecnologías de diferentes características de funcionamiento. Es sobre esta base que el costo de los proyectos geotérmicos es evaluado para la inversión, la aprobación y el financiamiento de los inversionistas potenciales, los gobiernos, los consumidores o reguladores y los banqueros o los proveedores de crédito. En promedio, el $LCoE$ para proyectos nuevos de geotermia varía de 6 a 8 centavos de dólar por kWh (aproximadamente de 78 centavos a 1.04 pesos), sin embargo se reconoce que el costo para proyectos de geotermia individuales puede variar significativamente en base a los distintos factores de costo, y que los costos para todos los proyectos de energía cambian en el tiempo con las condiciones económicas [60]. La metodología usada para el cálculo del $LCoE$

está basada en prácticas económicas establecidas y usadas en los Estados Unidos (USA) para reportar varios componentes del costo. Para este estudio se utiliza la relación de Zhou [61]:

$$LCoE = \frac{\dot{Z}_{an} + \dot{Z}_{O\&M}}{\dot{E}_{año}} \quad (4.8)$$

4.1.2. Costos de operación y mantenimiento (O&M)

Los costos de operación y mantenimiento dependen en cierta medida sobre las decisiones tomadas al comienzo del diseño del sistema (etapa conceptual). Estos costos están formados por costos fijos y costos variables. Los costos fijos son aquellos que ocurren independientemente de que el sistema opere o no y los costos variables dependen de la carga de operación y la programación del sistema. Los factores que afectan el costo de operación y mantenimiento pueden ser categorizados como costos ordinarios de O&M los cuales incluyen costos de personal, administrativos y refacciones. En promedio estos costos de O&M son relativamente bajos para las plantas geotérmicas. El costo de generación de energía renovable hasta el 2009 se encontraba en USD \$ 0.0117 por kWh. En Kenia el costo alcanzaba alrededor de USD \$ 0.00763 por kWh, con un factor de planta de 90 % para plantas binarias y 94 % para las plantas flash [60]. Otros costos de operación y mantenimiento manejados en plantas geotérmicas sugieren un precio de USD \$ 0.005 , un precio por debajo de los anteriores [62].

4.2. Análisis técnico-económico

4.2.1. Evaluación del ahorro de energía primaria

Para evaluar el índice de ahorro de energía primaria se tienen que introducir los parámetros de rendimiento que se utilizan en sistemas Multiproducto y posteriormente serán aplicados a la configuración propuesta. Primeramente se dan los indicadores para el sistema motriz primario, los enfriadores activados térmicamente y el aprovechamiento de energía térmica en invernaderos y el tanque de almacenamiento de ACS. Debido a las dificultades para cuantificar los beneficios alcanzados por el uso de las plantas multiproducto, sobre las plantas tradicionales se han formulado varios criterios de evaluación. Estos indicadores están basados principalmente en la Primera Ley de la Termodinámica y en muy pocos casos en la Segunda Ley. A continuación se presentan los indicadores para evaluar de forma integrada el sistema, tanto desde el punto de vista energético y del ahorro de energía: mediante el IAEP y la reducción de GEI.

Rendimiento global

La relación de los productos útiles del sistema motriz primario, electricidad y calor, respecto al combustible suministrado para producirlos es la eficiencia global del sistema en sistemas CHP [1], de manera semejante es para el sistema propuesto, esto tomando en cuenta que la energía proveniente del pozo geotérmico se asume como energía primaria y los productos son electricidad, Calor y frio, Ecuación 4.9:

$$\eta_{CAS} = \frac{E + F + Q_{INV} + Q_{ACS}}{F_{CAS}} \quad (4.9)$$

La Ecuación 4.9 también puede ser definida de forma similar por el Factor de Utilización de la Energía (FUE). Este concepto llamado también Rendimiento Global, es un concepto basado en la Primera Ley de la Termodinámica.

Rendimiento exergético

Debido a la diferencia establecida en la Segunda Ley de la Termodinámica entre un flujo de calor y otro de electricidad, es evidente para una valoración económica adecuada aplicar un analisis correcto del rendimiento exergético. Por lo que la Ecuación 4.9 en términos de exergía se define como [1]:

$$\psi = \frac{E - F \left(1 - \frac{T_0}{T_F}\right) + Q_{INV} \left(1 - \frac{T_0}{T_{INV}}\right) + Q_{ACS} \left(1 - \frac{T_0}{T_{ACS}}\right)}{BF_{CAS}} \quad (4.10)$$

Una vez definidos los parámetros anteriores, para la evaluación del ahorro de energía primaria se hace analogía con un sistema CHCP, esto debido a que el sistema en cascada produce básicamente tres productos (electricidad+calor+frio). La Figura 4.1, muestra el esquema general de una trigeneración, en este caso todo el calor recuperado del sistema motriz primario se dirige a la tecnología activada térmicamente (TAT) donde experimenta un determinado proceso y se obtiene frío. La Figura 4.1, sirve como base para interpretar los parámetros de rendimiento que se definirán a continuación.

Ahorro de energía primaria AEP

El ahorro de energía primaria introduce los terminos: índice de ahorro de energía primaria (PES, por us siglas en inglés, Primary Energy Savings), relación de ahorro de energía del combustible (FESR, Fuel Energy Saving Ratio) y eficiencia del ahorro de combustible son términos equivalentes utilizados para evaluar el ahorro de energía primaria. El Indice de ahorro de energía primaria (IAEP) mide directamente la cantidad de combustible ahorrado, por tanto es un indicador de rendimiento razonable.

En la Evaluacion del IAEP se realiza una comparación del sistema propuesto con la gene-

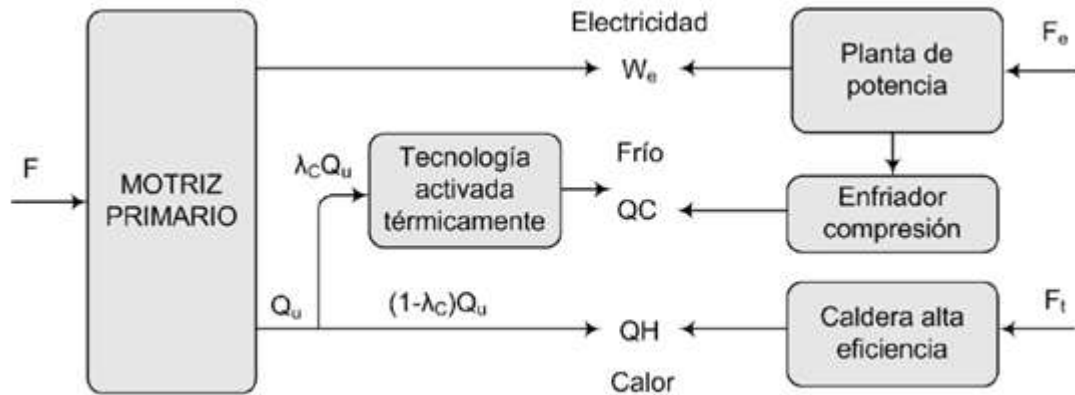


Figura 4.1: Analogía con un sistema de trigeneración.

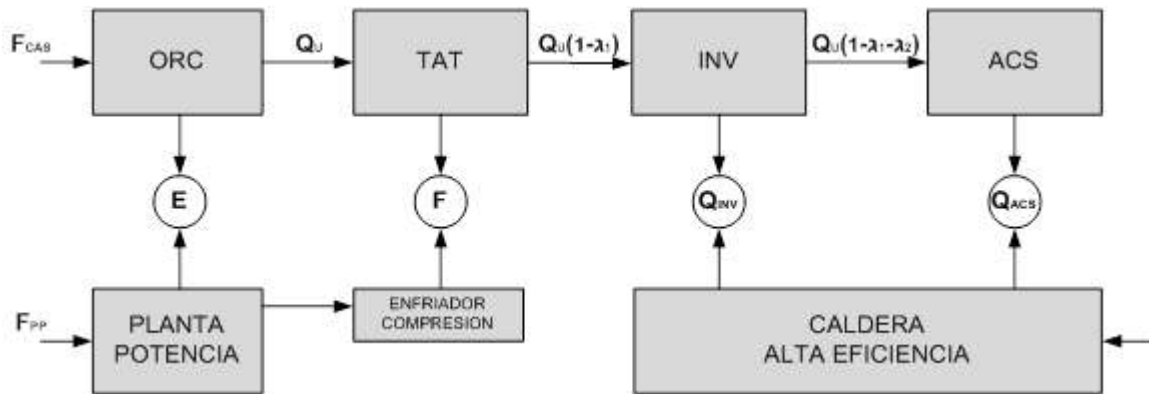


Figura 4.2: Comparativa del sistema en cascada y la generación por separado de energía.

ración convencional. Tal comparación se basa en el suministro de electricidad de una planta convencional de potencia eléctrica, la producción de calor en una caldera de alta eficiencia y la producción de frío con sistemas de convencionales de enfriamiento por compresión. El indicador se basa en comparar el consumo de combustible en la planta multiproducto con el consumo que se requeriría para satisfacer esas mismas demandas (electricidad, calor y frío), si fueran producidas de forma convencional en instalaciones independientes, esto es, en una central de potencia de rendimiento eléctrico $RefE$ y en una caldera de rendimiento $RefH$ y $COPRef$ cuando se produce adicionalmente frío, ver Figura 4.1. El inconveniente del IAEP es que es incapaz de proporcionar información útil para la asignación de costos del calor y la electricidad. A continuación en la Figura 4.2, se muestra el sistema propuesto y como se aprecia es muy semejante a una planta CHCP.

Básicamente y con la analogía realizada, la evaluación del IAEP se realiza mediante las

ecuaciones 4.11, 4.12 y 4.13 [1]:

$$IAEP = \frac{AEP}{F^*} \quad (4.11)$$

Donde:

$$AEP = F^* - F_{CAS} \quad (4.12)$$

$$F^* = \frac{E}{RefE} + \frac{F}{RefE \cdot COP_{Ref}} + \frac{Q_{INV}}{RefH} + \frac{Q_{ACS}}{RefH} \quad (4.13)$$

4.2.2. Evaluación de la reducción de gases de efecto invernadero

El aspecto más importante respecto a los impactos ambientales será determinar si el sistema mejora o degrada la calidad del aire. Los niveles de emisión dependen de la tecnología motriz primaria, el año de fabricación, la antigüedad de la unidad, la potencia nominal, la carga de operación (porcentaje de la potencia nominal), el tipo y calidad del combustible utilizado, la operación del equipo instalado para disminuir los agentes contaminantes, etc. Los componentes de los gases de combustión que son de importancia debido a los riesgos que presentan al entorno y a la salud son los siguientes:

- Dióxido de Carbono, CO₂ .
- Monóxido de Carbono, CO.
- Óxidos de Nitrógeno, NO.
- Óxidos de Azufre, SO_x (el más usual es SO₂).
- Hidrocarburos inquemados (urburned fuel, C_xH_y).
- Partículas sólidas.

Las leyes y normativas especifican los máximos niveles de emisión para las instalaciones que utilicen dispositivos que experimenten un proceso de combustión. Como datos orientativos, la tablas 4.3 y 4.4, muestran niveles típicos de emisiones para varias tecnologías motriz primario [1].

Para determinar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), es útil comparar un sistema integrado (ver, Figura 4.2) con la producción separada de electricidad

y calor desde el punto de vista de las emisiones contaminantes, similar al procedimiento para evaluar el IAEP. Esto puede hacerse mediante un balance de emisiones de cada contaminante. Si todas las fuentes contaminantes se toman en consideración, independientemente de donde están se obtiene lo que se conoce como balance global de emisiones. Si sólo se consideran las fuentes en sitio, se obtiene un balance local. En este apartado se establece la reducción de emisiones de GEI para el sistema en cascada utilizando la analogía de plantas CHCP y utilizando el balance global. Establecidos estos balances se podrá determinar la posible reducción de emisiones para el sistema en cascada. Ahora mediante las ecuaciones 4.14 - 4.17 se determinan las emisiones y reducción de emisiones del sistema propuesto:

Para las emisiones del sistema en cascada se ha considerado que la energía que ingresa al ORC proveniente del pozo geotérmico y emite una sexta parte en comparación con el gas natural. Y se determinan mediante:

$$m_{co2} = \varepsilon_{co2}^F F \quad (4.14)$$

Ahora la Reducción de Gases de Efecto Invernadero (*REGI*) se define como:

$$RGEI = \frac{\Delta GEI}{m_{co2}^*} \quad (4.15)$$

Donde:

$$\Delta GEI = m_{co2}^* - m_{co2} \quad (4.16)$$

Para la masa de emisiones de la producción por separado se tiene:

$$m_{co2}^* = \varepsilon_{co2}^E E + \varepsilon_{co2}^E \frac{F}{COP_{Ref}} + \varepsilon_{co2}^F \frac{Q_{INV}}{RefH} + \varepsilon_{co2}^F \frac{Q_{ACS}}{RefH} \quad (4.17)$$

4.2.3. Valor Actual Neto

El Valor Actual Neto (*VAN*) es, el valor presente del beneficio total de una inversión que resulta de la diferencia entre el valor presente de todos los gastos y el valor presente de todas las ganancias (incluyendo ahorros) durante el ciclo de vida de la inversión o del sistema [59]. La expresión matemática para el valor presente es:

$$VAN = \dot{B}_{an} \left(\frac{(1+i)^{(N-1)}}{i(1+i)^N} \right) \quad (4.18)$$

En la Ecuación 4.18, influyen el beneficio (ganancias) o flujo neto de efectivo (ingresos + ahorros - gastos) en el año. El término “beneficio” se usa con un significado general, ya que puede ser negativo, cuando el resultado neto del año es una pérdida.

Con este indicador se pueden distinguir tres situaciones características:

- $VAN > 0$ La inversión es viable económicamente bajo las condiciones especificadas.
- $VAN = 0$ La inversión es económicamente viable y tiene una posibilidad de retorno.
- $VAN < 0$ La inversión no es viable económicamente, bajo las condiciones especificadas.

4.2.4. Período de Retorno Simple

Existen dos definiciones de período de retorno: período de retorno simple y período de retorno descontado. El Período de Retorno Simple (PRS) es el plazo de tiempo que se necesita para que las inversiones efectuadas en el proyecto sean recuperadas completamente mediante los flujos generados por el proyecto y actualizados mediante una tasa de descuento:

$$PRS = \frac{\dot{Z}_{an}}{AE_{tot}} \quad (4.19)$$

Donde:

$$AE_{tot} = VAN \left(\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^{(N-1)}} \right) \quad (4.20)$$

El período de retorno puede calcularse fácilmente, pero tiene serias deficiencias debido a que no considera el valor del dinero en el tiempo y el comportamiento de la inversión después del período de retorno, favoreciendo las inversiones de corta vida útil, que en muchas ocasiones son arriesgadas económicamente, las inversiones con valor alto PRS tienen un alto VAN, lo cual es deseable [1] y [59].

4.2.5. Tasa Interna de Retorno

También es conocida como tasa de retorno o retorno a la inversión y es la tasa de interés que origina el valor presente de una serie de gastos y que sea igual al valor presente de una serie de ingresos. A diferencia del VAN la TIR es desconocida. Las tasas de rentabilidad interna es la tasa máxima de interés que podría pagar un proyecto por los recursos utilizados

para recuperar la inversión, los gastos de operación y que tenga entradas y gastos iguales. La expresión matemática que la define es:

$$\dot{Z}_{an} = \dot{B}_{an} \left(\frac{(TIR + 1)^{(N+1)}}{TIR(TIR + 1)^N} \right) \quad (4.21)$$

4.3. Análisis exergoeconómico con enfoque de Tsatsaronis

La exergía se define como el máximo trabajo obtenible, mientras que el sistema se comunica con el medio ambiente de forma reversible. El análisis exergético ha demostrado ser una herramienta poderosa para identificar la ubicación, la magnitud y las fuentes de ineficiencias termodinámicas en sistemas térmicos. Esta información, que no puede ser proporcionada por un análisis de la energía, es muy útil para mejorar la eficiencia global de un sistema o para comparar el rendimiento de varios sistemas. Un análisis de exergía convencional identifica los componentes del sistema con la destrucción de exergía.

Un análisis exergético avanzado intenta abordar esta deficiencia. La teoría de la división de la destrucción de exergía permite la mejor comprensión de los valores de destrucción de exergía de un análisis exergético y por lo tanto mejora la exactitud del análisis, facilitando de esta manera la mejora de la eficiencia térmica de los sistemas. El objetivo de este análisis es utilizar el siguiente criterio “la destrucción de exergía dentro de cada componente se divide en partes exógenos / inevitables / evitables y endógenos” [63], [64] y [65].

Para el análisis exergético avanzado, para los sistemas de control de volumen de flujo estable de estado estacionario, las ecuaciones de balance se escriben para flujos de exergía en los componentes del sistema. El balance exergético del k -ésimo componente se puede escribir como:

$$\dot{E}x_{f,k} = \dot{E}x_{p,k} + \dot{E}x_{d,k} \quad (4.22)$$

Los tipos de entrada de exergía fluidos del sistema se evalúan a partir de las ecuaciones 3.68 y 3.73. La eficiencia exergética y la relación de la destrucción de exergía del componente k -ésimo puede definirse, respectivamente, como:

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}x_{p,k}}{\dot{E}x_{f,k}} = 1 - \frac{\dot{E}x_{d,k}}{\dot{E}x_{f,k}} \quad (4.23)$$

$$y_{d,k} = \frac{\dot{E}x_{d,k}}{\dot{E}x_{f,tot}} \quad (4.24)$$

Por otra parte, la interdependencia entre los componentes del sistema, la tasa de destrucción de exergía dentro de cada componente de orden k se puede dividir fácilmente en endógena y partes exógenas, de la siguiente manera:

$$\dot{E}x_{d,k} = \dot{E}x_{d,k}^{EN} + \dot{E}x_{d,k}^{EX} \quad (4.25)$$

Las partes endógenas y exógenas son la tasa de destrucción de exergía de k -ésimo componente asociado con el funcionamiento del componente en sí mismo. La parte endógena es la tasa de irreversibilidad que ocurren dentro del componente k -ésimo cuando todos los demás componentes funcionan sin tarifas de irreversibilidad (teóricamente).

Para evaluar el potencial realista de mejorar el componente k -ésimo, la tasa de destrucción de exergía dentro de los componentes de orden k se puede partir en su evitable (AV) e inevitable (UN):

$$\dot{E}x_{d,k} = \dot{E}x_{d,k}^{UN} + \dot{E}x_{d,k}^{AV} \quad (4.26)$$

Las partes inevitables y evitables son la tasa de destrucción de exergía que no puede ser evitado o no debido a las limitaciones tecnológicas. Por lo tanto, la parte inevitable se calcula considerando cada componente en aislamiento y separado del sistema, usando las condiciones más favorables se tiene:

$$\dot{E}x_{d,k}^{UN} = \dot{E}x_{p,k}^{real} \left(\frac{\dot{E}x_d}{\dot{E}x_p} \right)_k^{UN} \quad (4.27)$$

Al combinar estos dos conceptos de división, definiciones útiles (inevitable-endógena, inevitable-exógena, evitable-endógena y evitable-exógena) se puede determinar la destrucción de exergía. La parte evitable endógena puede determinar las ineficiencias causadas por el propio componente del sistema, que puede ser eliminado, mientras que la parte evitable exógeno puede revelar las ineficiencias que pueden ser reducidas por las mejoras estructurales del sistema general o por la mejora de la eficiencias de los componentes restantes y por la mejora de la eficiencia de la componente que está siendo considerada. Esto se calcula mediante :

$$\dot{E}x_{d,k}^{UN,EN} = \dot{E}x_{p,k}^{EN} \left(\frac{\dot{E}x_d}{\dot{E}x_p} \right)_k^{EN} \quad (4.28)$$

$$\dot{E}x_{d,k}^{UN,EX} = \dot{E}x_{d,k}^{UN} - \dot{E}x_{d,k}^{UN,EN} \quad (4.29)$$

$$\dot{Ex}_{d,k}^{AV,EN} = \dot{Ex}_{d,k}^{EN} - \dot{Ex}_{d,k}^{UN,EN} \quad (4.30)$$

$$\dot{Ex}_{d,k}^{AV,EX} = \dot{Ex}_{d,k}^{EX} - \dot{Ex}_{d,k}^{UN,EX} \quad (4.31)$$

La eficiencia exergética modificada y la destrucción de exergía evitable endógeno del componente *k-ésimo* se calculan, respectivamente, por:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Ex}_{p,k}}{\dot{Ex}_{f,k} + \dot{Ex}_{d,k}^{UN} + \dot{Ex}_{d,k}^{AV,EX}} \quad (4.32)$$

$$y_{d,k}^{AV,EN} = \frac{\dot{Ex}_{d,k}^{AV,EN}}{\dot{Ex}_{f,tot}} \quad (4.33)$$

Capítulo 5

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1. Resultados del análisis energético

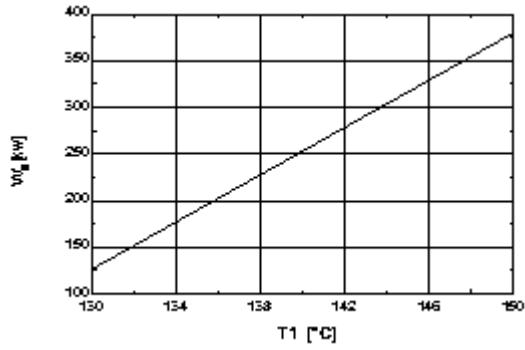
La variación de la temperatura del fluido geotérmico a la entrada del evaporador del ORC, se ve reflejada en la temperatura en la producción de potencia de la tecnología motriz primario y a su vez esta temperatura es la que tiene mayor importancia para la generación de electricidad, calor y frío del sistema en cascada.

Para el caso que se planteó y con las suposiciones realizadas del modelado energético, se obtiene cierto potencial evaluado. La Tabla 5.1, muestra la cuantificación de la producción de electricidad calor y frío del sistema multiproducto.

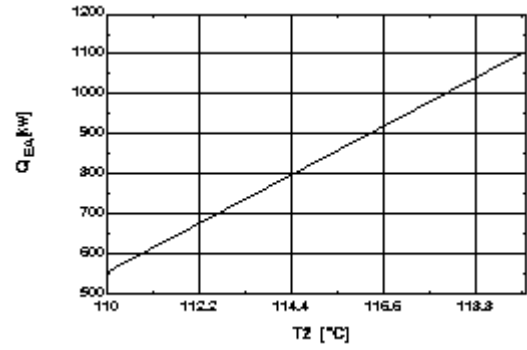
En la Tabla 5.1, se cómo y en qué cantidad se puede convertir la energía contenida en el recurso geotérmico a los tres productos (calor + electricidad + frío). Sin embargo, los cálculos mostrados son para un estado fijo, para tener una mejor interpretación visual de la generación, se realizaron unas variaciones en las temperaturas de entrada a cada parte o subsistema del sistema en general. Estas variaciones sólo se efectúan en un rango de temperaturas y se aprecia en las figuras 5.1 y 5.2.

Cuadro 5.1: Generación de electricidad, calor y frío

Generación	Cuantificación
Potencia eléctrica (W_e)	380 kW
Frío (Q_{EA})	1109 kW
Calor en Invernaderos (Q_{INV})	1584 kW
Calor ACS (Q_{ACS})	3168 kW
Calor específico aportado (q_{ACS})	167 kJ/kg
Calor específico requerido (q_{RACS})	167 kJ/kg

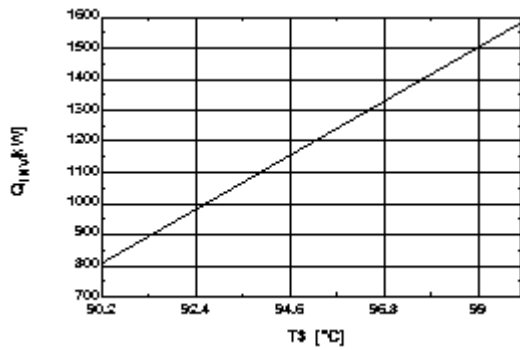


(a) Producción de electricidad en función de la temperatura de entrada en el ORC.

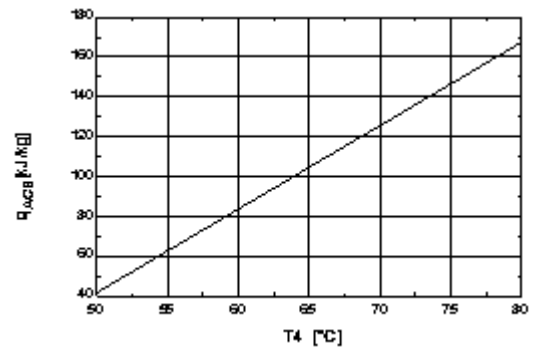


(b) Capacidad de enfriamiento respecto de la temperatura de entrada a la TAT.

Figura 5.1: Comportamiento del sistema en la generación de electricidad y frío.



(a) Energía térmica cedida a invernaderos por parte del fluido geotérmico a cierta temperatura.



(b) Variación del calor específico cedido por el fluido geotérmico para la producción de ACS.

Figura 5.2: Comportamiento de la energía térmica cedida por el sistema.

Cuadro 5.2: Flujos energéticos y parámetros de diseño ORC.

Flujo/parámetro	Cuantificación
Potencia eléctrica (W_e)	410.6 kW
Potencia de la bomba (W_B)	9.7 kW
Calor evaporador (Q_{EVP})	3144 kW
Calor condensador (Q_{CON})	2743 kW
Eficiencia del ciclo (η_{ciclo})	12.75 %
Delta pinch-point (Δ_{pp})	20
Área del evaporador (A_{EVP})	34.4 m ²
Área del condensador (A_{CON})	53 m ²

En el gráfico de la Figura 5.2, se aprecia la curva para el calor que puede ceder el fluido geotérmico al agua de la red para la producción de ACS, ese calor es mayor o igual que el requerido para tal cometido, por lo que satisface dicha producción.

5.2. Resultados del análisis termodinámico

5.2.1. Ciclo Rankine Orgánico

La finalidad del ORC es producir la electricidad en el sistema en cascada, pero para obtener este producto se requiere hacer un análisis detallado de los equipos que conforman el ORC. Es decir, se necesita conocer los flujos energéticos del sistema y esto se logra mediante un análisis empleando el primer principio de la Termodinámica. Por otra parte, las áreas de transferencia de calor son otros parámetros de diseño que se obtienen cuando se efectúa el análisis. La Tabla 5.2, muestra algunos flujos de energía y parámetros de diseño.

Las cuantificaciones mostradas en la Tabla 5.2, corresponden a un recurso de entrada en el sistema de 150 °C, sin embargo éstas pueden variarse respecto de este recurso que es la energía primaria del sistema a igual que otros parámetros operativos de la planta, esto para observar el comportamiento a diferentes temperaturas del fluido geotérmico. La Tabla 5.3, muestra las variaciones de los flujos energéticos y parámetros de la planta.

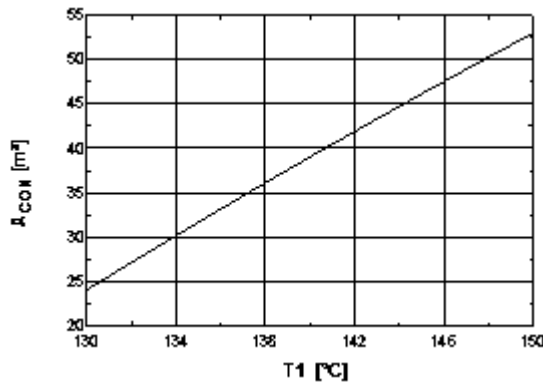
A manera gráfica la Tabla 5.3, se resume en las figuras 5.3 - 5.6. Donde se aprecia los cambios de los parámetros de diseño, operativos y flujos energéticos de la planta ORC.

Como se aprecia, la planta ORC muestra un mejor desempeño a elevadas temperaturas del recurso geotérmico, es decir cuando el fluido geotérmico se encuentra a una mayor temperatura provoca que la planta logre un desempeño mejor.

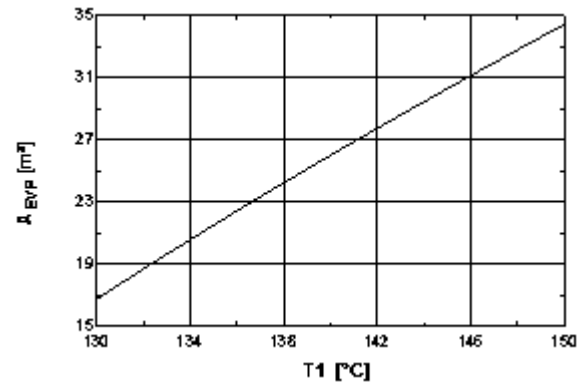
La variación de la temperatura del fluido geotérmico a la entrada del evaporador se ve

Cuadro 5.3: Variación de los flujos energéticos y parámetros del ORC.

T_1	T_{12}	W_B	W_T	A_{CON}	A_{EVP}	η_{ciclo}	$\dot{m}_{iso}$	Q_{CON}	Q_{EVP}
150	109.5	9.771	410.6	53	34.42	12.75	7.053	2743	3144
147.8	108.4	8.931	380.4	49.98	32.6	12.63	6.620	2569	2941
145.6	107.3	8.128	350.8	46.92	30.75	12.52	6.186	2395	2738
143.3	106.3	7.361	321.8	43.81	28.87	12.4	5.749	2221	2536
141.1	105.3	6.628	293.4	40.65	26.96	12.29	5.31	2047	2334
138.9	104.3	5.927	265.6	37.44	25.02	12.18	4.869	1873	2133
136.7	103.3	5.256	238.4	34.18	23.03	12.07	4.426	1699	1932
134.4	102.4	4.613	211.7	30.87	20.99	11.96	3.981	1525	1732
132.2	101.4	3.997	185.6	27.52	18.9	11.85	3.533	1351	1533
130	100.5	3.407	160	24.12	16.75	11.74	3.084	1177	1334

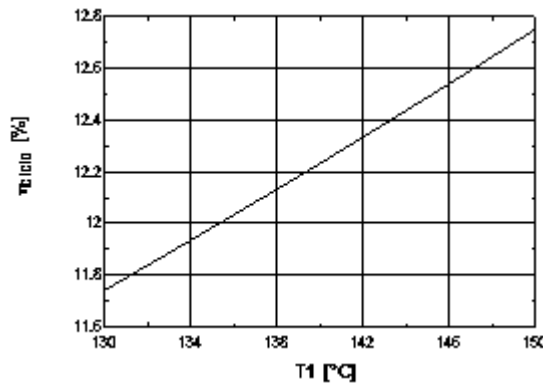


(a) Variación del área del condensador respecto de la temperatura del fluido geotérmico.

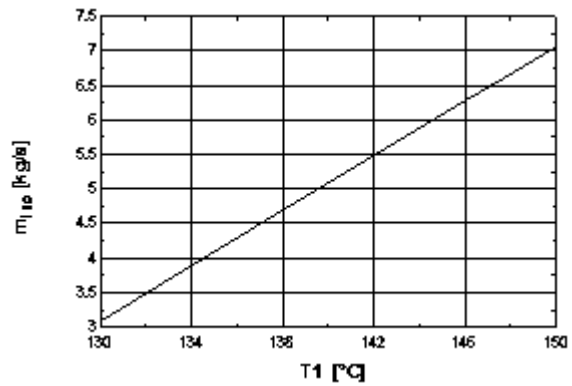


(b) Variación del área del evaporador respecto de la temperatura del fluido geotérmico.

Figura 5.3: Variaciones de las áreas de transferencia de calor del ORC.

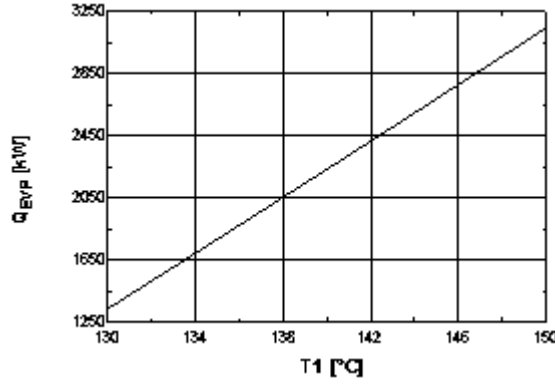


(a) Variación de la eficiencia del ciclo en función de la temperatura del fluido geotérmico.

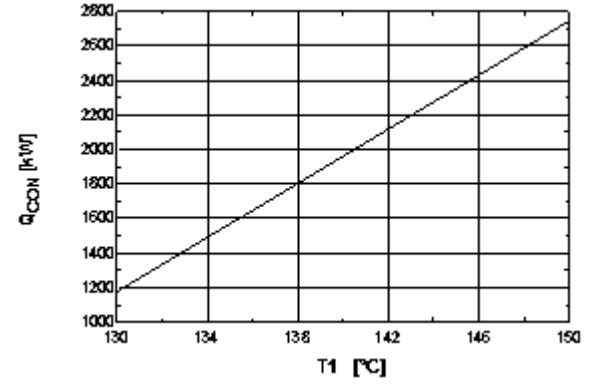


(b) Variación del flujo másico de isopentano respecto de la temperatura del fluido geotérmico.

Figura 5.4: Eficiencia del ciclo y flujo de isopentano.

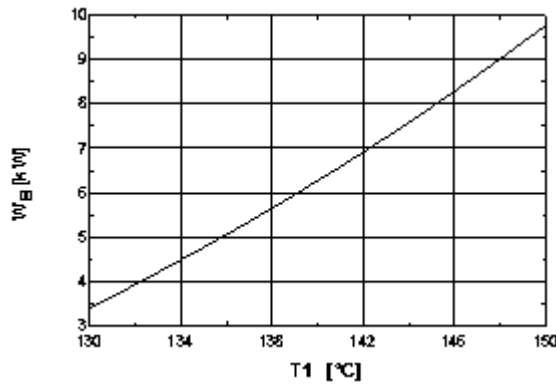


(a) Variación del flujo de calor en el evaporador respecto de la temperatura del fluido geotérmico.

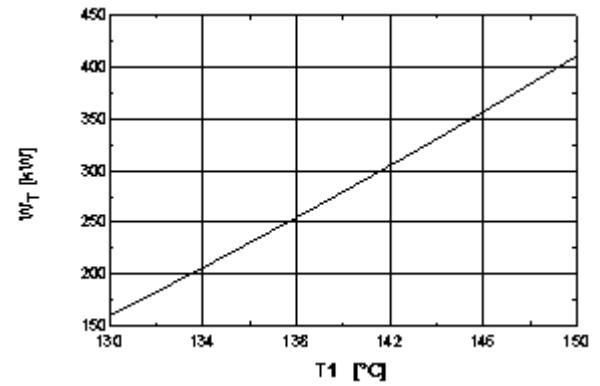


(b) Variación del flujo de calor en el condensador respecto de la temperatura del fluido geotérmico.

Figura 5.5: Energía térmica absorbida y desechada por el ciclo.



(a) Variación de la potencia consumida por la bomba respecto de la temperatura del fluido geotérmico.



(b) Variación de la potencia producida en la turbina respecto de la temperatura del fluido geotérmico.

Figura 5.6: Producción y consumo de potencia del ORC.

Cuadro 5.4: Variación de la producción de potencia del ORC en tres escenarios.

(a) Variación de la potencia respecto del flujo de masa a $T=150^{\circ}\text{C}$.		(b) Variación de la potencia respecto del flujo de masa a $T=140^{\circ}\text{C}$.		(c) Variación de la potencia respecto del flujo de masa a $T=130^{\circ}\text{C}$.	
$\dot{m} (kg/s)$	$W_T (kW)$	$\dot{m} (kg/s)$	$W_T (kW)$	$\dot{m} (kg/s)$	$W_T (kW)$
50	985.5	50	670.7	50	384
46.67	919.8	46.67	626	46.67	358.4
43.33	854.1	43.33	581.3	43.33	332.8
40	788.4	40	536.6	40	307.2
36.67	722.7	36.67	491.9	36.67	281.6
33.33	657	33.33	447.2	33.33	256
30	591.3	30	402.4	30	230.4
26.67	525.6	26.67	357.7	26.67	204.8
23.33	459.9	23.33	313	23.33	179.2
20	394.2	20	268.3	20	153.6

reflejada en la temperatura del isopentano a la salida del evaporador y/o entrada de la turbina del ciclo. La temperatura del fluido geotérmico en el evaporador no sólo afecta la temperatura del fluido de trabajo (isopentano), sino también influye notablemente en otros parámetros de la planta. El flujo másico, la potencia, la eficiencia del ciclo son algunos de estos parámetros. En la Tablas 5.4, se presenta la variación en la producción de potencia en función de la temperatura del fluido geotérmico y del flujo másico.

La potencia de la turbina puede ser compensada con un mayor flujo de masa cuando el recurso geotérmico es de baja temperatura, es decir, si se aumenta el flujo de agua geotérmica en el evaporador, se puede obtener una mayor producción de potencia en la planta aun cuando se disponga de una menor temperatura en el agua del fluido geotérmico. En la Figura 5.7, se puede apreciar este comportamiento.

5.2.2. Ciclo de refrigeración por absorción $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$

El modelo del ciclo de refrigeración se realizó con la finalidad de obtener los parámetros de comportamiento del ciclo. Los parámetros que más influyen en el desempeño del ciclo son la presión y la temperatura. Por lo que se realizaron diversas pruebas para obtener el valor de temperatura y presión que provoca un mayor coeficiente de operación en el ciclo.

Las variaciones se efectuaron en las temperaturas y presiones de salida del generador, evaporador y absorbedor, con la finalidad de obtener cómo estas variables influyen en el desempeño del ciclo. La Tabla 5.5 y Figura 5.8, muestran la influencia de la temperatura y

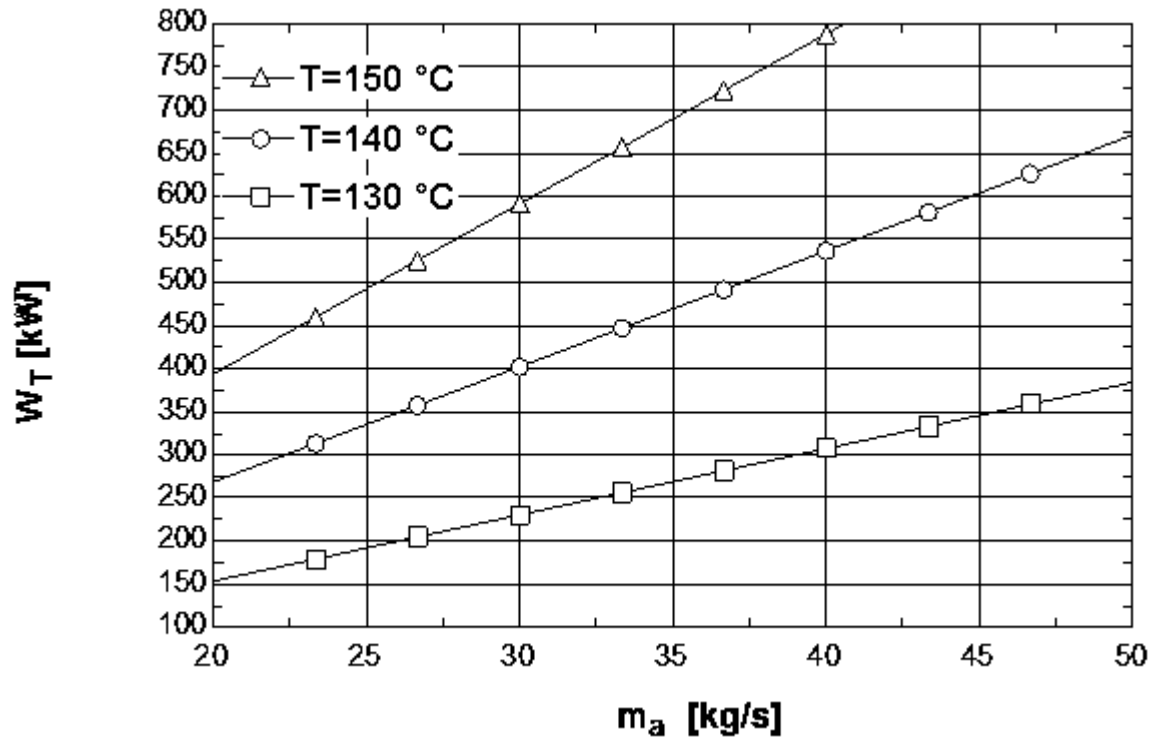


Figura 5.7: Variación de la producción de potencia en función del flujo del fluido geotérmico.

la presión del generador en el desempeño del ciclo.

Otros parámetros que ya han sido mencionados y que influyen notablemente en el desempeño del ciclo son la temperatura y presión a la salida del absorbedor. Las Tabla 5.6 y Figura 5.9, muestran el comportamiento del desempeño en función de estas variables.

La temperatura a la salida del evaporador también limita el desempeño del ciclo. La Tabla 5.7 y Figura 5.10, muestran este comportamiento.

La finalidad de realizar las comparaciones del COP frente a los parámetros operativos que influyen en el sistema de refrigeración por absorción es obtener el mejor desempeño del ciclo. En la Tabla 5.8, se muestra el valor de las variables que hace que el COP se incremente.

5.2.3. Calefacción de invernaderos

En la primera etapa del análisis de invernaderos se tienen los resultados del análisis de pérdidas de energía, esto para conocer si la energía que se tiene disponible para esta etapa de la cascada puede brindar calefacción al invernadero o algún cierto número de invernaderos. Por lo que primeramente, se tienen que asignar las dimensiones del invernadero. A continuación se muestra en la Figura 5.11, para estas dimensiones.

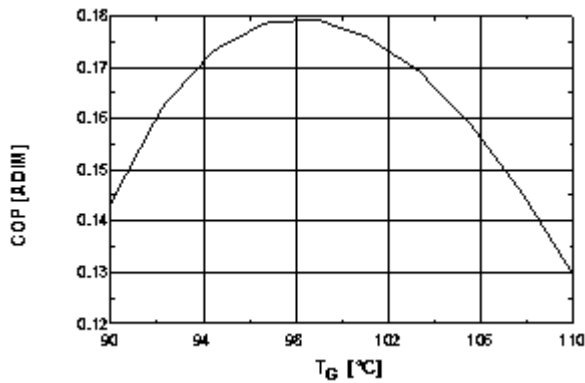
Cuadro 5.5: Coeficiente de operación en función de (a) la temperatura y (b) la presión del generador.

(a) Variación del COP respecto de la temperatura del generador.

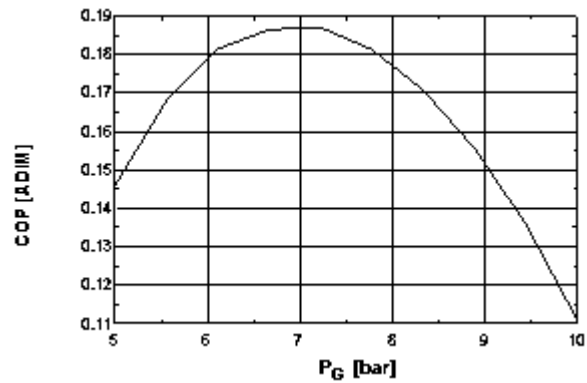
$T_G (^{\circ}C)$	COP
110	0.1296
107.8	0.1456
105.6	0.159
103.3	0.1693
101.1	0.1758
98.89	0.1793
96.67	0.1786
94.44	0.1732
92.22	0.1622
90	0.1436

(b) Variación del COP respecto de la presión del generador.

$P_G (bar)$	COP
10	0.111
9.444	0.1359
8.889	0.1556
8.333	0.1707
7.778	0.1813
7.222	0.187
6.667	0.1865
6.111	0.1815
5.556	0.1681
5	0.1459



(a) Variación del COP respecto de la temperatura.



(b) Variación del COP respecto de la presión.

Figura 5.8: Variación del COP respecto de (a) la temperatura y (b) la presión del generador.

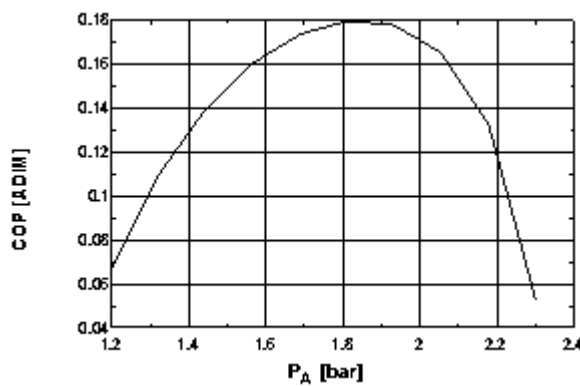
Cuadro 5.6: Variación del coeficiente de operación en función de (a) la presión y (b) la temperatura del absorbedor.

(a) Variación del COP respecto de la presión en el absorbedor.

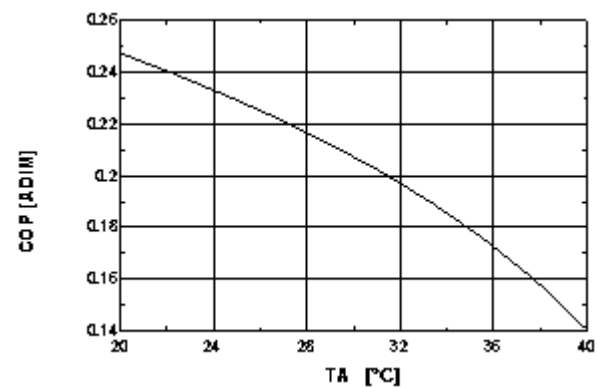
P_A (bar)	COP
2.3	0.05295
2.178	0.1328
2.056	0.1649
1.933	0.1777
1.811	0.1796
1.689	0.1736
1.567	0.1606
1.444	0.1399
1.322	0.1099
1.2	0.0669

(b) Variación del COP respecto de la temperatura del absorbedor.

T_A ($^{\circ}\text{C}$)	COP
40	0.1405
37.78	0.1596
35.56	0.1757
33.33	0.1896
31.11	0.2018
28.89	0.2126
26.67	0.2224
24.44	0.2313
22.22	0.2396
20	0.2472



(a) Variación del COP respecto de la presión en el absorbedor.



(b) Variación del COP respecto de la temperatura en el absorbedor.

Figura 5.9: Variación del COP respecto de (a) la presión y (b) la temperatura del absorbedor.

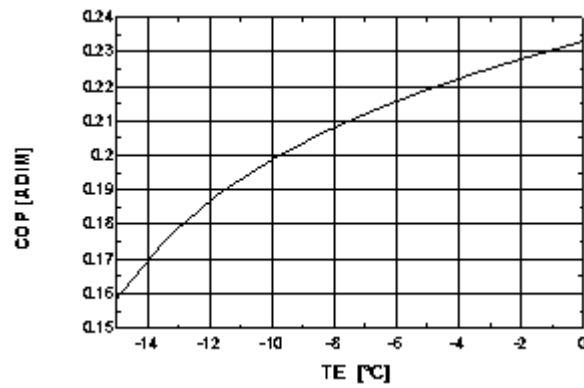


Figura 5.10: Variación del COP respecto de la temperatura del evaporador.

Cuadro 5.7: Variación del COP respecto de la temperatura del evaporador.

$T_E(^{\circ}C)$	COP
0	0.233
-1.667	0.2288
-3.333	0.2242
-5	0.2191
-6.667	0.2133
-8.333	0.2067
-10	0.1988
-11.67	0.1891
-13.33	0.1765
-15	0.1585

Cuadro 5.8: Variables que generan un mayor COP.

Variable	Valor
Temperatura del generador	98.89 °C
Presión del generador	790 kPa
Temperatura del absorbedor	35 °C
Presión del absorbedor	180 kPa
Temperatura del evaporador	-13 °C

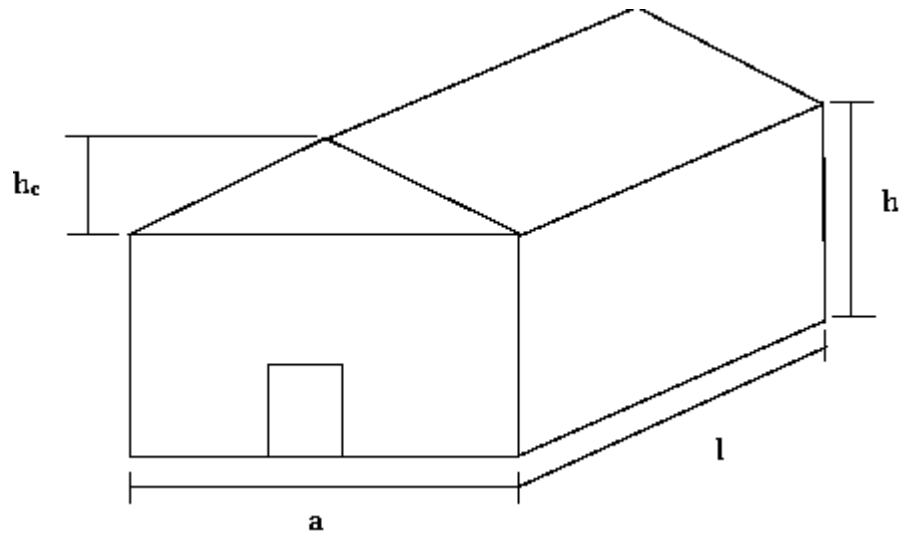


Figura 5.11: Dimensiones del invernadero baticenital.

Cuadro 5.9: Pérdidas de energía en el invernadero.

Pérdidas de calor debidas a:	Cuantificación (W)
El material (Q1)	9216
La resistencia del suelo (Q2)	20605
Cambios de aire frío (Q3)	2052
Por radiación (Q4)	7968
Totales (Qt)	39840

Donde en la Figura 5.11, $a = 7m$, $l = 10m$, $h = 3.2m$ y $h_c = 1.3m$.

Ahora la Tabla 5.9, aloja los resultados para las pérdidas de energía que se presentan en el invernadero y que se evaluaron mediante las ecuaciones 3.85, 3.36 y 3.50.

Mediante la cuantificación de las pérdidas de energía totales se puede obtener el número de invernaderos a los que se les puede brindar calefacción. Para ello se puede utilizar el calor suministrado a invernaderos pero debido a que esta energía no se puede utilizar en su totalidad es más conveniente para tener resultados más fiables utilizar la exergía de este flujo de calor. Así que el número de invernaderos resultantes son:

$$n_{INV} = \frac{B_{INV}}{Q_T} = \frac{298.7}{39.84} = 7.49$$

Si en caso de que las pérdidas totales de energía que se presentan en el invernadero hubiesen sido mayor a la exergía destinada al conjunto de invernaderos, se tendría como resultado el

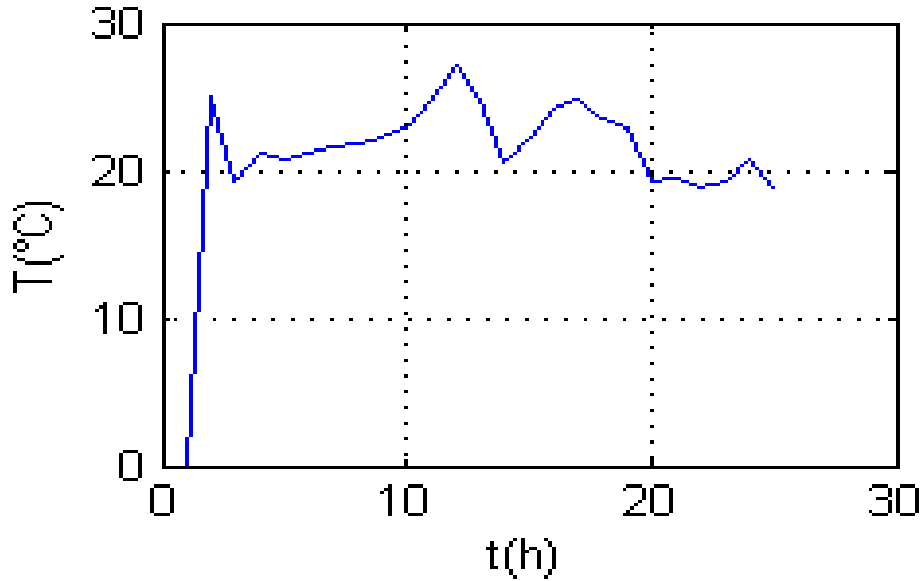


Figura 5.12: Temperatura interior del invernadero con calefacción.

inconveniente de que no se podría brindar calefacción a invernaderos con las especificaciones anteriormente declaradas.

Otro aspecto importante que se tienen que mencionar en los resultados de esta investigación es que debido a las variaciones de temperatura durante el día los invernaderos requieren de una mayor demanda de energía para calefacción resaltando sin lugar a duda la noche. A continuación se muestra la gráfica que se obtuvo como resultado para la distribución de temperaturas dentro del invernadero.

En la primera Figura 5.12, se muestra un día típico durante el año al cual se le agrego calefacción y en el otro esquema (Figura 5.13) tomada de [66] . Es un día típico pero sin calefacción. La diferencia que existe entre ambos gráficos es el incremento en la temperatura debido a la calefacción. La calefacción mejora la temperatura en el interior del invernadero y la mantiene cercana a 24 y 25 °C que es la temperatura óptima para la producción de jitomate y que es uno de los objetivos secundarios de este trabajo.

Esta gráfica es obtenida suministrando 2.5 kg/s de agua a 100 °C a esta etapa de la cascada. Por lo que si se desea obtener el número de invernaderos a los que se les puede brindar calefacción y producir jitomate, basta con dividir el flujo total de fluido geotérmico por el flujo másico que requiere cada invernadero.

$$n_{INV} = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_s} = \frac{20.83}{2.5} = 8.3$$

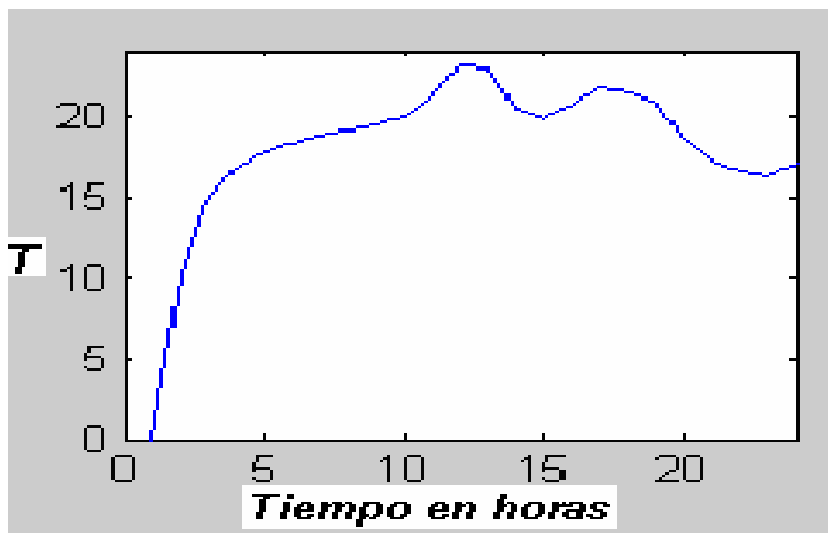


Figura 5.13: Distribución de temperaturas de un invernadero (Tomada de [66])

Por lo que comparando el resultado obtenido por pérdidas de energía para el número de invernaderos y el obtenido debido al flujo másico es muy semejante.

El flujo juega un papel importante en la calefacción del invernadero, por lo que se varió la cantidad de flujo másico suministrado durante el día, esto para tratar de uniformizar la temperatura lo más cercano posible. Para esto se realizaron algunas variaciones para diferentes épocas del año, por lo que se tomó un día típico de cada estación. A continuación, se muestran estas variaciones:

La Figura 5.14, muestra el comportamiento en el interior del invernadero para un día típico de primavera sin calefacción. Como se aprecia la temperatura es muy inestable y presenta grandes picos y valles en el transcurso del día. Sin embargo, agregando calefacción se puede obtener una temperatura un poco más estable y muy cercana a la temperatura óptima de producción de jitomate, ver Figura 5.15.

Para tratar de estabilizar este comportamiento de la temperatura se optó por variar el suministro del flujo másico, es decir, cuando la temperatura es muy baja se tiene un mayor suministro de flujo para tratar de equilibrarla. Las variaciones del flujo másico van desde los 11 kg/s de la 01:00 a las 11:00 del día y desde 3 kg/s de la 21:00 a las 24:00. Otro resultado que fue obtenido es que durante el medio día no se requiere calefacción por lo que el sistema de calefacción deja de operar en estas horas.

Otro comportamiento de la temperatura en el interior del invernadero se aprecia en un día típico de verano. La figura 5.16, muestra el comportamiento sin adición de calefacción al invernadero. Mientras que la Figura 5.17, muestra el comportamiento de la temperatura con

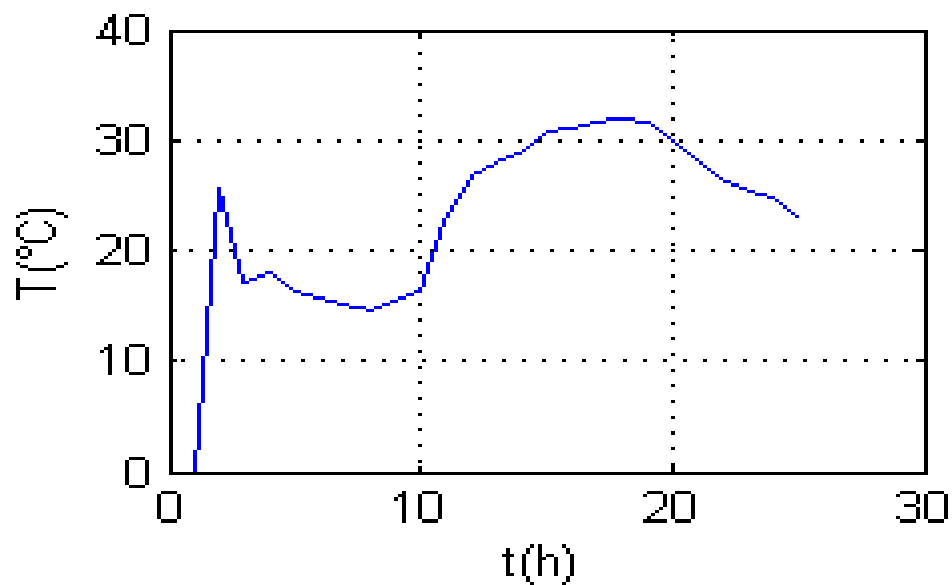


Figura 5.14: Temperatura del invernadero sin calefacción en un día típico de primavera.

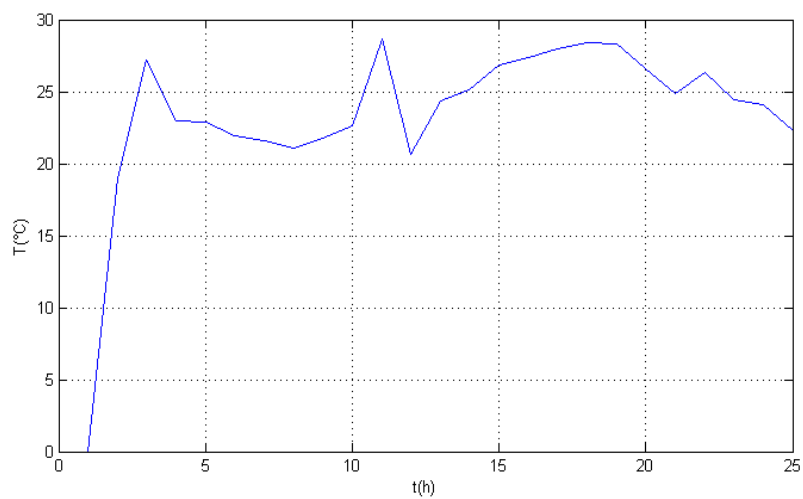


Figura 5.15: Temperatura del invernadero con calefacción en un día típico de primavera.

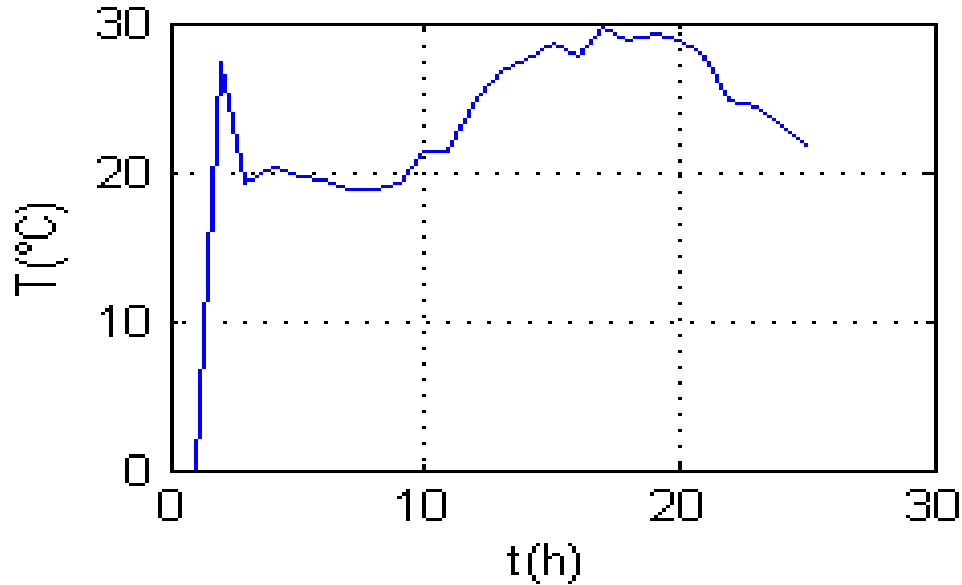


Figura 5.16: Temperatura del invernadero sin calefacción en un día típico de verano.

el suministro de calefacción y tratándola de aproximar a los 25 °C. Las variaciones de flujo de masa van desde los 9 kg/s desde las 01:00 a las 11:00 y de los 4 kg/s desde las 21:00 a las 24:00. El resto de horas del día no requiere calefacción.

Durante el otoño también se aprecia un comportamiento diferente de la temperatura del aire interior de los invernaderos. La Figura 5.18, muestra este comportamiento sin calefacción. Agregando calefacción la temperatura tiende a estabilizarse. Las variaciones del flujo másico del fluido geotérmico enviado al invernadero varían desde los 9 kg/s hasta los 4 kg/s, de la 01:00 a las 10:00 y de las 21:00 a las 24:00 respectivamente, ver Figura 5.19.

Finalmente se muestra el resultado obtenido para la época más fría del año. La Figura 5.20, muestra el comportamiento del interior del invernadero para el invierno (sin calefacción). En el suministro de la calefacción las variaciones de flujo másico varían desde los 9 kg/s de 01:00 a 12:00 y de 7 kg/s desde las 19:00 a las 24:00 (ver Figura 5.21).

Como se puede apreciar en todos los resultados obtenidos para el comportamiento de la temperatura en el interior del invernadero se aprecia que la mayor cantidad de energía demandada para calefacción por parte del invernadero surge por las noches. Otro resultado importante es que el invernadero no requiere de calefacción al medio día (12:00).

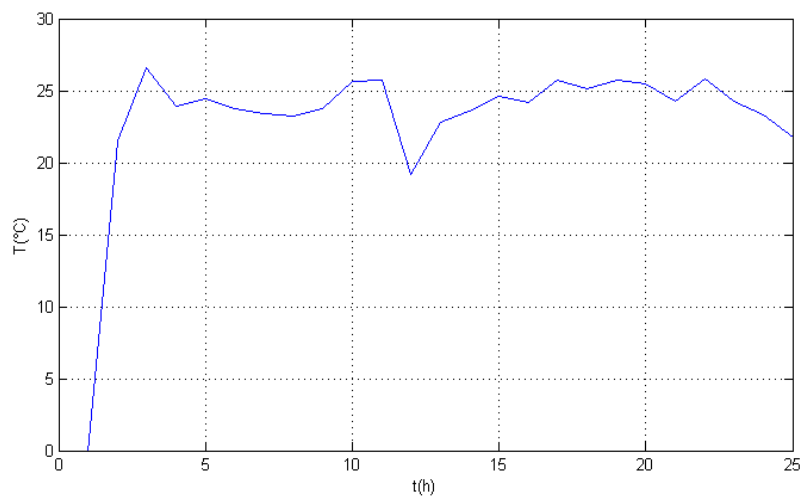


Figura 5.17: Temperatura del invernadero con calefacción en un día típico de verano.

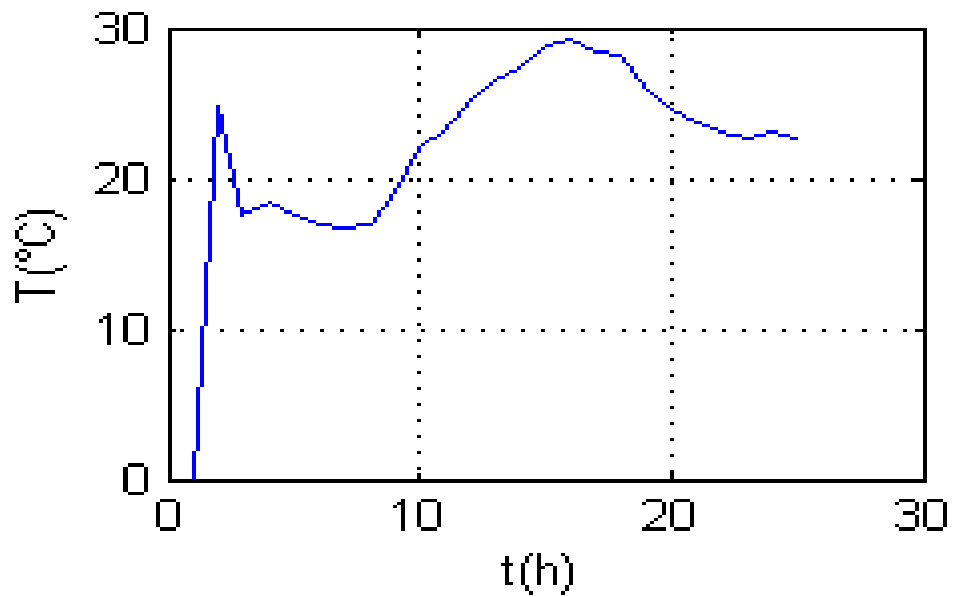


Figura 5.18: Temperatura del invernadero sin calefacción en un día típico de otoño.

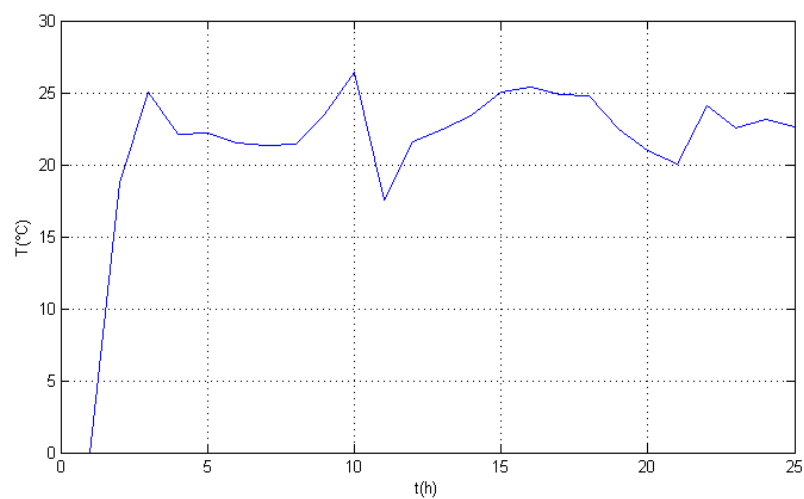


Figura 5.19: Temperatura del invernadero con calefacción en un día típico de otoño.

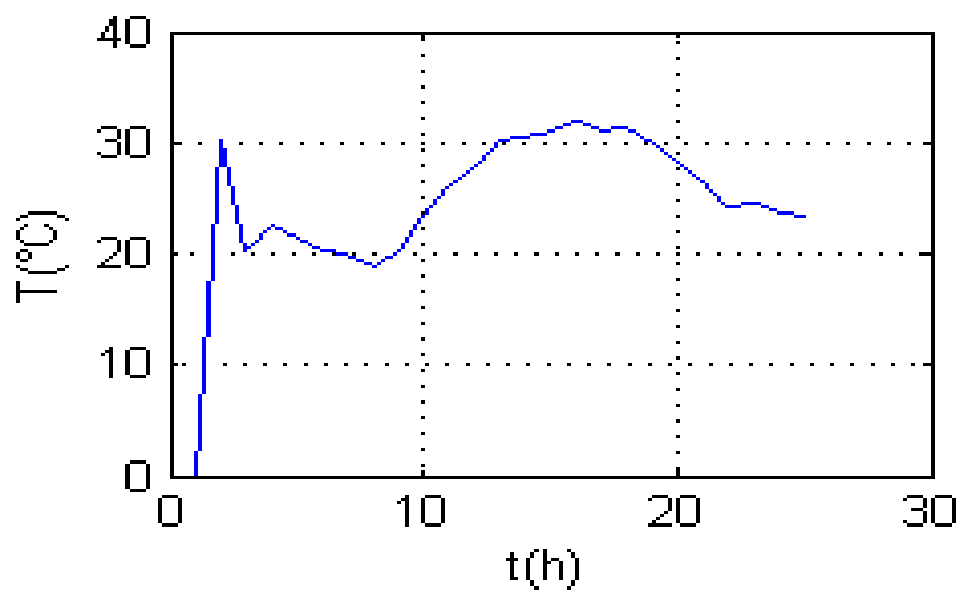


Figura 5.20: Temperatura del invernadero sin calefacción en un día típico de invierno.

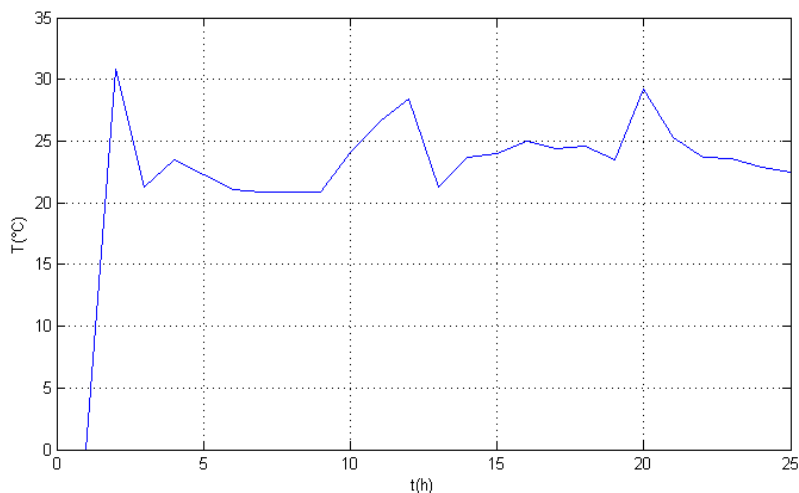


Figura 5.21: Temperatura del invernadero con calefacción en un día típico de invierno.

5.2.4. ACS para viviendas

El tanque de almacenamiento de ACS es el último nivel térmico en donde se aprovecha la energía térmica del fluido geotérmico. En este tanque se almacena el ACS y posteriormente es enviada o consumida por el conjunto de viviendas con su respectiva demanda de agua caliente. En el modelado de este tanque realizado en MATLAB se han obtenido las curvas características del consumo de agua caliente y de la distribución de temperatura en el interior del tanque, ver figuras 5.22 y 5.23.

Un parámetro importante que influye en la distribución de temperaturas del tanque de ACS es el volumen del tanque y el número de viviendas ya que este número determina el comportamiento de la curva que se aprecia en la Figura 5.22. El volumen del tanque obtenido para este caso en específico y bajo las condiciones del modelado es de 45 m^3 , para un número de viviendas de 65.

Como se aprecia en la Figura 5.23, la temperatura del tanque siempre se mantiene por encima de los 60°C que es la temperatura que se demanda para ACS, esta temperatura se comporta en el interior del tanque en función principalmente de la demanda energética de las viviendas.

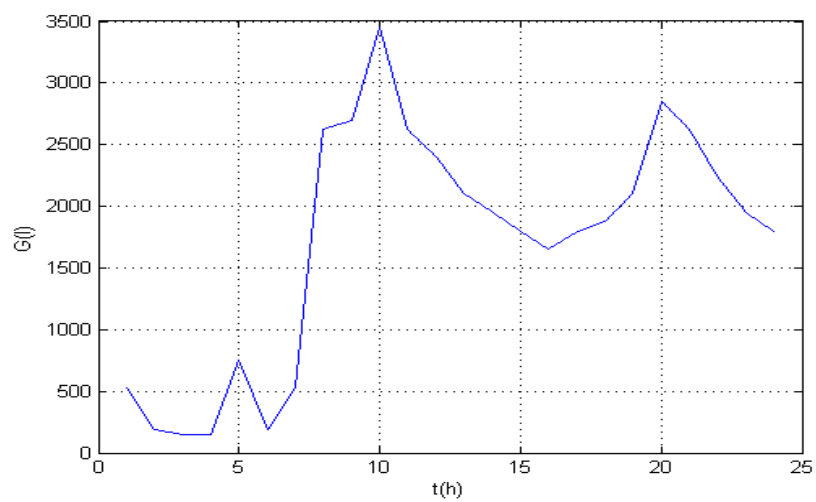


Figura 5.22: Distribución del consumo de agua durante el día.

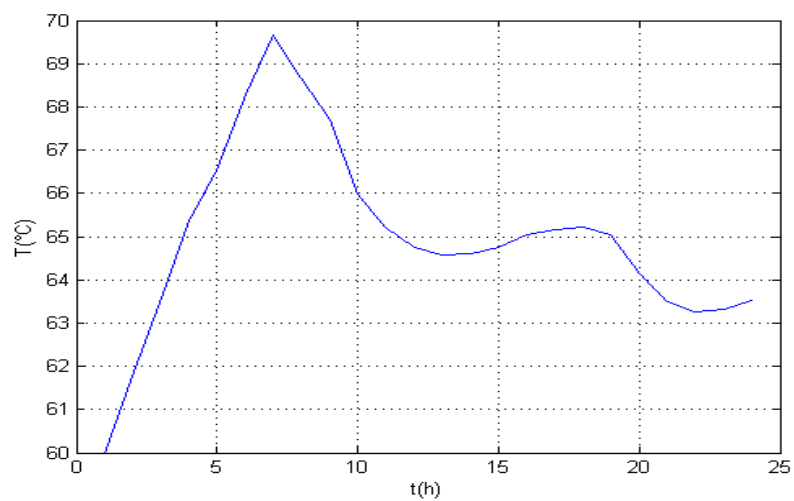


Figura 5.23: Comportamiento de la temperatura del tanque respecto del tiempo.

Cuadro 5.10: Flujos exergéticos del sistema en cascada.

Estado	B[kW]
1	2157
2	408.7
3	1172
4	-117.7
5	839.3
6	479.6
7	4.354
8	0
9	54.42
10	3034
11	57.42
36	0.00009
37	1.132
38	9.834
39	35.02
40	0

5.3. Resultados del análisis exergético del sistema en cascada

Para el análisis exergético se ha considerado el diagrama en cascada que aparece en la Figura 3.17. Es un análisis generalizado por cada etapa de la cascada en la cual se obtiene un producto. Este análisis ha permitido conocer de manera más acertada la prestación y la cuantificación de los productos del sistema multiproducto. A continuación la Tabla 5.10, muestra las valoraciones obtenidas para las corrientes exergéticas.

Un resultado importante es conocer la cantidad de energía que no se puede utilizar en cada etapa del sistema. Para ello se muestra en la siguiente Tabla 5.11 la destrucción de exergía por cada componente del sistema integrado.

Como se aprecia en la Tabla 5.11, el componente del sistema que tiene una mayor destrucción de exergía es el pozo geotérmico, una explicación es que éste se ha considerado durante el análisis de forma semejante a una caldera y debido a esto es por lo que tiene la mayor destrucción de exergía.

Por otra parte, para el conjunto de viviendas la destrucción de exergía es muy baja, esto es debido a que las exergías que llegan en forma de electricidad y calor se consideran que casi son consumidas o son productos en su totalidad.

Cuadro 5.11: Destrucciones de exergía en el sistema.

Equipo	B_{dest}[kW]
ORC	576.6
ABS	215
INV	359.7
TANQUE ACS	420.8
VIVIENDAS	3.222
CAMARA	63.3
POZO	933.7
BOMBA	6.839

Cuadro 5.12: Flujos exergéticos para el ORC.

Estado	B[kW]
1	2013
2	410.6
3	1142
12	649.6
13	175.9
14	150.4
15	8.248
16	9.771
17	17

5.3.1. Análisis exergético por equipos en el ORC

Para tener un análisis más acertado del sistema motriz primario u ORC en este caso, se hizo el análisis exergético de este ciclo componente por componente. Para llevar a cabo dicho cometido se ha utilizado la parte del ORC de la Figura 3.18.

En este análisis se obtienen las corrientes de exergía del ORC que en este caso son del fluido de trabajo isopentano, así como también los flujos externos del ciclo, como lo son las potencias entrantes y salientes tanto caloríficas como de potencia eléctrica y/o mecánica.

A continuación las tablas 5.12 y 5.13, muestra los resultados de las exergías y destrucciones de exergías obtenidas para el ORC bajo las suposiciones consideradas para el modelado.

El equipo en el que más se destruye exergía en este caso es el equipo que aprovecha la energía del fluido geotérmico y la aprovecha para el ORC. Otro resultado importante se obtiene mediante la comparativa de la destrucción de exergía que se tiene en el ORC analizándolo por componente a analizarlo por un solo bloque.

En sumatoria la destrucción de exergía para el ORC analizando sus componentes resulta

Cuadro 5.13: Destrucciones de exergía de los componentes del ORC.

Equipo	B_{dest} [kW]
Turbina	63.08
Condensador	17.22
Bomba	1.02
Evaporador	238.2

ser de 319.6 kW. Mientras que por bloque, es decir tomándolo como en el análisis general de la cascada se tiene un resultado para la destrucción de exergía de 576.6 kW, ver Tabla 5.11. Esto indica que el resultado obtenido en el análisis generalizado está un poco sobrado ya que el análisis por equipo es más exacto. Sin embargo, el estudio es aceptable ya que se tiene una buena aproximación y en caso de instalación de un sistema de este tipo influye como factor de seguridad.

5.3.2. Análisis exergético por equipos en la máquina de absorción

El análisis exergético de los componentes de la máquina de refrigeración por absorción proporciona como resultado una estimación más real de los flujos que se localizan en la misma. En este análisis se obtienen las corrientes exergéticas de la mezcla $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ y los flujos de calor y potencia que ingresan o salen de este ciclo. La Tabla 5.14 muestra la valoración obtenida para las exergías de la TAT en base a las suposiciones realizadas al modelado.

Teniendo la cuantificación de las corrientes exergéticas del ciclo de refrigeración por absorción se obtienen las destrucciones de exergía por cada equipo, resultando la Tabla 5.15.

La mayor destrucción de exergía para la TAT se efectúa en el evaporador que es donde se retira el calor de la cámara de enfriamiento. Realizando una comparativa entre la destrucción de exergía obtenida en el análisis generalizado de la cascada y el obtenido por el análisis por separado de los equipos de la máquina de absorción, se obtiene una mayor destrucción de exergía con el sumatorio de la destrucción de exergía de los equipos de la ARP. Por lo que para utilizar un estudio más aproximado se utilizan las destrucciones que se muestran en la Tabla 5.15.

Por otra parte, el análisis exergético es una estimación muy aproximada ya que la exergía obtenida en el modelado para el generador es de 839 kW y la ficha técnica de la máquina indica que ésta requiere de 900 kWt para su activación y así poder producir 500 kWf.

Es notorio que con las temperaturas de entrada y salida del fluido geotérmico no se podrán proporcionar los 900 kWt requerido por el generador, por lo que la máquina no operará a

Cuadro 5.14: Flujos exergéticos de la máquina de refrigeración por absorción.

Estado	B[kW]
3	984.3
4	582.2
5	715.8
19	-13.22
20	132.7
21	126.4
22	37.46
23	1038
24	579.9
25	2.92
26	582.8
27	612.3
28	615.3
29	717.8
30	642
32	155
33	0.0004693
34	180.4
35	121.6

Cuadro 5.15: Destrucciones de exergías en el ciclo de refrigeración por absorción.

Equipo	B_{dest}[kW]
Condensador	2.141
V1	6.329
Evaporador	671.1
Absorbedor	69.86
Bomba	0
V2	2.955
Intercambiador	43.37
Rectificador	33.34
Generador	51.81

Cuadro 5.16: Costos de inversión.

Equipo	Costo de inversión (MUSD \$)
ORC	1635
ABS	1261
INVERNADERO	24.5
TANQUE ACS	3632
CAMARA	50.97
POZO	600
BOMBA	29.50

Cuadro 5.17: Precio asignado a los productos.

Concepto	Precio/unidad
Electricidad	0.08 USD/kWh
Hielo	0.15 USD/kg
Tomate	0.4 USD/kg

su límite de carga. A las condiciones supuestas de temperaturas de entrada y salida del generador y determinando las exergías de este flujo de calor, la máquina sólo puede operar aproximadamente a un 30 % de su capacidad.

5.4. Resultados del análisis económico

El análisis económico arroja la información que permite conocer si la instalación de un sistema de este tipo es viable o no. Para ello primeramente el resultado del análisis económico que se muestra son los costos de inversión en cada etapa del sistema en cascada, ver Tabla 5.16.

En la Tabla 5.16, aparecen los resultados de costos de inversión, éstos suman en total para el sistema MUSD \$ 7234. En el caso de los invernaderos el costo representa la instalación de 7 invernaderos de 70 m² cada uno.

Una vez que se obtiene el costo de inversión éste se tiene que anualizar. El costo anualizado de inversión se obtiene a partir de la Ecuación 4.4 y equivale a MUSD \$ 849.663.

Los costos de inversión son el primer desembolso que se realiza para la integración del sistema, pero para conocer si el sistema es viable o no se tienen que conocer los ingresos debido a los productos que se obtienen en el sistema. Las tablas 5.17 y 5.18, muestran precio de los productos e ingreso debido a los productos del sistema respectivamente.

La venta de hielo tiene un gran aporte de ingresos, en esta parte el recurso agua se

Cuadro 5.18: Beneficios por venta de productos.

Concepto de ingreso	Ingreso (MUSD \$)
Venta de electricidad	243.464
Beneficio de ACS	10450
Venta de hielo	15.68
Venta de tomate	582.8

Cuadro 5.19: Valoración de los indicadores económicos para el sistema en cascada.

Indicador	Valoración
TIR	2.91
VAN	88130
PRS	0.08765
LoCE	0.3351
Ban	9694

considera que es comprado y posteriormente se vende como hielo (producto). El sistema puede obtener ingresos por venta de productos por un total de MUSD \$ 10710.

El beneficio anual nos representa la comparativa de los ingresos y los egresos, este beneficio es importante para conocer si se tienen ganancias por año. Para el sistema en cascada se tiene un beneficio anual de MUSD \$ 9694. Cabe mencionar que en este beneficio se asumió un costo de operación y mantenimiento del 20 % del costo total anualizado, esto debido a los alcances de este proyecto en el cual no se contempla un estudio detallado de los costos de O&M.

Finalmente la TIR y el VAN han resultado positivos por lo que representa que el sistema presenta una gran rentabilidad y una buena opción para invertir en sistemas de este tipo. La Tabla 5.19, muestra algunos de estos indicadores económicos descritos anteriormente.

5.5. Resultados IAEP y RGEI

El sistema multiproducto debido a que es un sistema diseñado para dar un mejor uso a la energía y por consecuente ser más amigable con el medio ambiente, muestra un notable ahorro de energía y de emisiones de gases de efecto invernadero al compararlo con un sistema que utiliza un combustible convencional y a la vez produce los productos de electricidad calor y frio por separado del sistema.

En específico, comparando el sistema en cascada con un sistema que requiere de un ORC y una caldera para producir electricidad, calor y frio quemando gas natural como combustible fósil. El sistema en cascada muestra una IAEP de 39.17 % mientras que ésto se ve reflejando

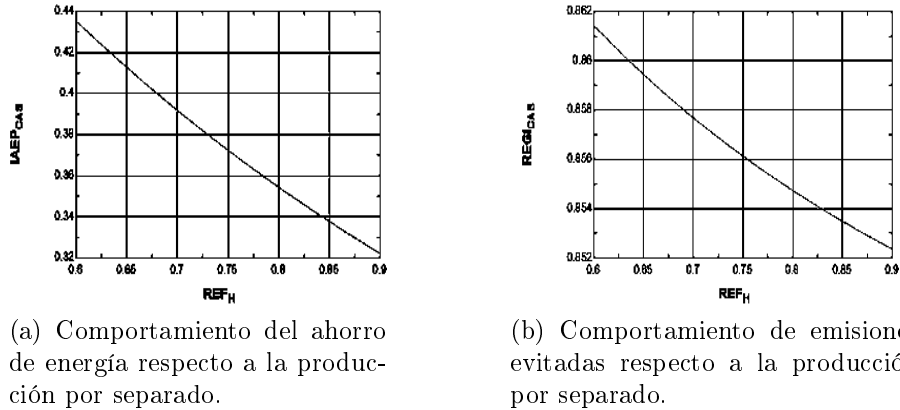


Figura 5.24: Ventajas del sistema frente a la producción por separado.

en una RGEI de 85.77 %. Cabe destacar que esta comparación no es la más adecuada ya que el sistema se debe de comparar con otro que utilice la misma fuente de energía (geotermia). Sin embargo, estos datos nos dan una idea de las ventajas que presenta la generación de energía en base a energía geotérmica (comparándola con el combustible fósil) que tienen la más limpia combustión, si se comparara con otro combustible, por ejemplo carbón, se tendría un mayor ahorro en emisiones de CO_2 . A continuación las figuras 5.24a y 5.24b muestran el comportamiento del IAEP y RGEI si se mejora el parámetro de referencia de la caldera convencional.

Adicionalmente realizando el análisis solamente del sistema en cascada éste presenta un gran desempeño debido a que su eficiencia global es de aproximadamente 66 %, sin embargo no es así con su eficiencia exergética (35 %) esto es debido a que el calor que se disipa en los invernaderos y en el tanque de ACS se disipa a temperaturas muy bajas.

Para tener una mejor noción de los análisis exergéticos y eficiencias exergéticas se puede observar la sección de resultados de análisis exergéticos.

5.6. Resultados del analisis exergoeconómico

En este apartado de resultados se muestran las destrucciones de exergías determinadas mediante el enfoque George Tsatsaronis. El método de análisis muestra los mismos resultados que se indican en la Tabla 5.11. Sin embargo mediante este método se han determinado otros parámetros como lo es la eficiencia exergética, la tasa de destrucción de exergía tomando en consideración un caso ideal y el real que es el sistema de generación en cascada. La Tabla 5.20, muestra las condiciones teóricas y reales del sistema.

Cuadro 5.20: Condiciones reales y teóricas de operación del sistema.

Componente	Parámetro	Unidad	Condición Real	Condición teórica
ORC	η_{ORC}	%	13	29.55
ABS	COP_{max}	-	0.7	1.7

Cuadro 5.21: Resultados del análisis exergético convencional, en condiciones reales.

Componente	$\dot{E}x_{f,k} (kW)$	$\dot{E}x_{p,k} (kW)$	$\dot{E}x_{d,k} (kW)$
ORC	2157	1581	576.6
ABS	1054	839.3	215
INVERNADERO	839.3	479.6	359.7
TANQUE ACS	479.6	58.77	420.8
VIVIENDAS	413.1	409.8	3.222
CAMARA	117.7	35.02	82.7
POZO	3034	57.42	933.7
BOMBA	9.834	54.42	6.839

Las condiciones ideales o teóricas se evaluaron mediante la eficiencia de Carnot a las condiciones de operación del sistema.

A continuación la Tabla 5.21, muestra los resultados para las exergías de los recursos, productos, destrucciones y pérdidas para el caso real.

Donde en este análisis las pérdidas de exergía han sido cuantificadas en 1991 kW.

En el análisis se determinan las destrucciones de exergía y los productos exergéticos en base a las condiciones ideales, una vez obtenidos los parámetros anteriores se aplica la Ecuación 4.27, resultando la parte de exergía inevitable, ya que en este análisis la exergía puede ser dividida en evitable e inevitable. La Tabla 5.22, muestra los resultados obtenidos bajo condiciones ideales o teóricas.

Cuadro 5.22: Análisis exergético convencional con condiciones teóricas.

Componente	$\dot{E}x_{f,k} (kW)$	$\dot{E}x_{p,k} (kW)$	$\dot{E}x_{d,k} (kW)$
ORC	2157	2101	56.23
ABS	1054	839.3	215
INVERNADERO	839.3	479.6	359.7
TANQUE ACS	479.6	58.77	420.8
VIVIENDAS	933.4	930.2	3.222
CAMARA	117.7	35.02	82.7
POZO	3034	57.42	933.7
BOMBA	9.834	54.42	6.839

Cuadro 5.23: Exergías evitables e inevitables.

Componente	$\dot{E}x_{d,k} (kW)$	$\dot{E}x_{d,k}^{UN} (kW)$	$\dot{E}x_{d,k}^{AV} (kW)$
ORC	576.6	42.31	534.3
ABS	215	215	-0.02413
INVERNADERO	359.7	359.8	-0.07901
TANQUE ACS	420.8	420.7	0.05247
VIVIENDAS	3.222	1.419	1.803
CAMARA	82.7	82.71	-0.008919
POZO	933.7	933.8	-0.05164
BOMBA	6.839	6.839	-0.0003465

Cuadro 5.24: Eficiencias exergéticas y tasa de destrucción de exergía.

Componente	$\epsilon_i (\%)$	$\epsilon_r (\%)$	$y (\%)$
ORC	97.39	73.27	7.114
ABS	79.61	79.61	2.653
INVERNADERO	57.14	57.14	4.439
TANQUE ACS	12.26	12.26	5.192
VIVIENDAS	100.3	100.8	0.03975
CAMARA	29.75	29.75	1.02
POZO	69.22	69.22	11.52
BOMBA	30.45	30.45	0.08439

La destrucción de exergía mediante condiciones ideales se disminuye notablemente en algunos equipos del sistema. Ahora mediante la aplicación del enfoque se obtienen las destrucciones de exergía evitables e inevitables, ver Tabla 5.23.

Ambas exergías (evitable + inevitable) conforman la destrucción de exergía real del sistema en cascada. Finalmente la Tabla 5.24, muestra la evaluación de las eficiencias exergéticas y tasas de destrucción de exergía en función de las condiciones ideales y reales.

Es notable que las eficiencias exergéticas en las condiciones ideales son mayores a las de las condiciones reales. Por otra parte, cabe mencionar que en este análisis solo se no se han ejecutado la evaluación de la destrucción de exergía exógena y endógena, esto debido a que no se tienen los parámetros reales y/o modificados del sistema, por lo que sólo se ha realizado un análisis muy generalizado utilizando este enfoque.

Conclusiones

Mediante el uso en cascada de los recursos geotérmicos se pueden obtener varios productos a partir de un solo recurso que generalmente es desperdiciado, teniendo así no sólo una mejor utilización o ahorro de energía sino evitando un consumo excedente de recursos no renovables. En el estudio se presentó la cuantificación del calor, electricidad y frío que se puede producir a partir de un recurso geotérmico de media temperatura, demostrando que la eficiencia global de un sistema de este tipo puede ser superior al 60 %.

Adicionalmente, de que el sistema en cascada otorga electricidad, calor y frío a partir de un solo recurso, este muestra una gran rentabilidad económica, un beneficio anual y una rápida recuperación de la inversión. Dentro de lo que se destaca a las etapas de producción de la cascada es la producción de hielo.

Por otra parte, el conjunto de invernaderos tiene un gran aporte en los beneficios del sistema. Sin embargo, bajo las condiciones que se realizó el modelado se obtiene que los invernaderos no requieren calefacción en la zona (Morelia, Mich.) para la producción de tomate ya que durante la modelación el comportamiento de la temperatura en el interior del invernadero no decae por debajo de los 12 °C que es una temperatura crítica para la producción de este tipo de producto. La ventaja que presenta agregar calefacción a pesar de lo descrito es que la temperatura interior de los invernaderos se trata de estabilizar cercas de los 24 °C durante las 24 horas del día y esto mejora la producción ya que es la temperatura óptima para la producción de tomate.

Por su parte, en el tanque de ACS se puede producir agua caliente para 65 viviendas a temperaturas adecuadas y conforme a las normativas. La simulación del tanque arroja que la temperatura se mantendrá por encima de los 60 °C que es la temperatura a la que se demanda el ACS.

Finalmente, la producción de electricidad en el ORC se puede incrementar, si se aumenta el flujo del fluido geotérmico y sin la necesidad de incrementar las temperaturas de entrada del ciclo.

Bibliografía

- [1] Rubio, M.C., Sistemas de Poligeneración Agua y Energía. s.l. : Academia Española, 20-80, España, Octubre (2011).
- [2] Rubio, M.C., Poligeneración de Energía Agua-Estado de las Tecnologías y Posibles Aplicaciones. s.l. : 1er Encuentro Regional de Energías Renovables, 1-25, Morelia, México, 9-10 de Septiembre (2009).
- [3] Suganthi, L. y A.S., Anand. Energy models for demand forecasting—A review. s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 1223-1240 (2012).
- [4] Kaygusuz, K., Energy for sustainable development: A case of developing countries. s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 1116-1126 (2011).
- [5] Internacional Energy Outlook. Predominio de Combustibles Fósiles en la Producción de Energía. [En línea] 22 de Febrero de (2012). http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid.
- [6] Cossent, A.R., Modelo para el Diseño Óptimo de un Sistema de Poligeneración y Energía Solar para el Suministro a un Conjunto de Viviendas. s.l. : Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia de Comillas, Madrid, España (2007).
- [7] Sener., Prospectiva del Petróleo crudo 2012-2026. [En línea] 7 de Mayo de (2013). http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/PPCI_2012_2026.pdf.
- [8] Renovables, Energías., Las Renovables Superan a las Fuentes Importadas de Energía. [En línea] 1 de Septiembre de (2012). www.las-renovables-superan-a-las-fuentes-importadas.htm.
- [9] Lior, N., Sustainable energy development: The present (2009) situation and possible paths. s.l. : Energy, Vols. 35, 3976-3994 (2010).

-
- [10] Regalado, R.C., Evolución y Perspectivas de Oferta y Demanda del Gas Natural en México (1990-2007). s.l. : Instituto Politecnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Sección de Investigacion y Posgrado, México (2009).
- [11] Hiriart, B.G., Evaluación de la Energía Geotermica en México. s.l. : Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la comisión Reguladora de Energía, México D.F. (2011). 12. Tech4cdm. La Cogeneración en México. [En línea] 30 de Octubre de (2010). www.tech4cdm.com.
- [12] Tech4cdm. La Cogeneración en México. [En línea] 30 de Octubre de (2010). www.tech4cdm.com.
- [13] Santoyo, E.C y H.A. Azapagic., Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. s.l. : Energy, 36, 1488-1499 (2011).
- [14] Energías Alternativas y Cambio Climatico. ipn. [En línea] 7 de Marzo de (2007). www.secademica.ipn.mx:70/ambiental/.
- [15] Llopis, T.G. y R.V. Angulo., Guía de la Energía Geotérmica. s.l. : 11-181, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, España.
- [16] Idae. Manual de Geotermia,. [En línea] 30 de Agosto de (2012). www.idae.es.
- [17] R., Bertani., World Geothermal Generation in 2007. s.l. : Proceedings European Geothermal Congress Unterhaching, Alemania, 30 Mayo al 1 de Junio (2007).
- [18] Lund, W.J., Direct Utilization of Geothermal Energy. s.l. : energies, 3, 1443-1471 (2010).
- [19] Ramírez, M.M., L.M. Sánchez y A.M Flores., Medición de la Presión, Temperatura y Calibración de Pozo GSE-S01, Localizado en la Población de Zimirao, Municipio de Zinapecuaro, Mich. s.l. : Comisión Federal de Electricidad, Morelia, México (2011).
- [20] Domínguez, A.G.M. y C.E Cadenas., Fundamentos de los Sistemas de Cogeneración Eléctrica. s.l. : 61-67, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México (2005).
- [21] Uclm. Guía de la Geotermia. [En línea] 30 de Agosto de (2012). http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaeupa/boletin_informativo/pdf/boletines/17/9.pdf.

-
- [22] 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).
- [23] Durgau, M., Cascading Use of Geothermal Energy With Moderate Temperature in Milk Pasteurization Plant. s.l. : 1-8, University of Oradea, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology.
- [24] Hjartarson, H., R. Maack y S. Jóhannesson., Multiple Use of Geothermal Energy. s.l. : 1-7, Húsavík energy, Islandia.
- [25] Tchanche, F.B., Low-grade Heat Conversion Into Power Using Organic Rankine Cycles – A Review of Various Applications. s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 3969-3979 (2011).
- [26] González, L.V., Aprovechamiento de la Energía Geotérmica de Media Temperatura Mediante Ciclos Binarios en España. s.l. : 1-10, ICAI-Universidad Pontificia de Comillas, España (2011).
- [27] Guo, T., H.X. Wang y S.J. Zhang., Fluids and Parameters Optimization for a Novel Cogeneration System Driven by Low-temperature Geothermal Sources. s.l. : 36, 2639-2649 (2011).
- [28] Heberle, F. y D., Bruggeman. Exergy Based Fluid Selection for a Geothermal Organic Rankine Cycle for Combined Heat and Power Generation. s.l. : Applied Thermal Engineering, 30, 1326-1332 (2010).
- [29] Schuster, A., S. Karellas, E. Kakaras y H. Spliethoff., Energetic and Economic Investigation of Organic Rankine Cycle Applications. s.l. : Applied Thermal Engineering, 29, 1809-1817 (2009).
- [30] Franco, A. y M. Villani., Optimal Design of Binary Cycle Power Plants for Water-Dominated, Medium-temperature Geothermal Fields. s.l. : Geothermics, 38, 379-391 (2009).
- [31] Imroz, S.M., M. Sellier, L.J. Brackney y S. Krumdieck., Efficiency Improvement for Geothermal Power Generation to Meet Summer Peak Demand. s.l. : Energy Policy, 37, 3370-3376 (2009).

-
- [32] Kanoglu, M. y A. Bolatturk., Performance and Parametric Investigation of a Binary Geothermal Power Plant by Exergy. s.l. : Renewable Energy, 33, 2366-2374 (2008).
- [33] García, M.J.,. Aprovechamiento del Vapor Endógeno Residual para la Instalación de Plantas de Ciclo Binario en el Campo Geotérmico de los Humeros Puebla. s.l. : Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSH, México (2008).
- [34] Cordoba, R.C., Energía Geotérmica. s.l. : Departamento de Ingenieria Mecanica, Universidad de Chile, Chile.
- [35] Orche, E., La Energía Geotermica. s.l. : 1° congreso de Xeotermia de Calicia, 1-42, Vigo, España, 30 de Noviembre (2010).
- [36] García, C., Potencial Geotérmico Español. s.l. : VII Jornada Anual de Nuevas Tecnologías Energéticas, 1-7, Madrid-España (2010).
- [37] Iftecnology. Energía Geotérmica. [Online] (2012) йил 22-Agosto. www.iftechnology.com.
- [38] Observatorio Tecnológico de la Energía. Mapa Tecnológico: Calor y Frío Renovables. [Online] (2012) йил 1-Febero. www.idae.es.
- [39] Piedra, L.A. Proyecto de una Central de Generacion Geotermica en el Ecuador. s.l. : Escuela Politecnica Naciona, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador (2011).
- [40] Campos, R.C. y otros siete autores. Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low. s.l. : Applied Thermal Engineering, 52, 109-119 (2013).
- [41] A. de J. Benítez Fundora, Comportamiento Termodinámico de un ORC con Varias Sustancias para el Aprovechamiento de Fuentes Térmicas de Bajo potencial, Vol. 13, 11 (2010)
- [42] Gazo, F. y L. Lind,. s.l. : Low Enthalpy Geothermal Energy-Technology Review, GNS Science Report, 20, Noviembre (2010).
- [43] Besel, S.A. Micro-trigeneracion: Investigación y Desarrollo de Soluciones Energéticas Integrales para Pequeños consumidores. [Online] (2010) йил 9-Mayo. www.besel.com.
- [44] Colibri. colibri-bv. [En línea] 5 de Mayo de (2013). www.colibri-bv.com.

-
- [45] Ávila, J.R., Selección del Equipo Refrigerante para una Cámara Frigorífica con Capacidad de 30 Ton de Producto, Facultad de Ingeniería Mecánica-Electrica, Universidad Veracruzana, Mexico (2005).
- [46] Adaro, J.A, P.D. Galimberti, A.I. Lema, A. Fasulo y H.R. Barral, Geothermal Contribution to Greenhouse Heating, *Applied Energy*, 64, 241-249 (1999).
- [47] eDiálogo. Invernadero Baticenital. [En línea] 11 de Agosto de (2013). <http://edialogo.ning.com/photo/invernadero-baticenital>.
- [48] Bakos, C.G., D. Fidanidis y N.F. Tsagas, Greenhouse Heating Using Geothermal Energy, *Geothermics*, 28, 759-765 (1999).
- [49] msc. Sistemas de Agua Caliente Sanitaria. [En línea] 20 de Mayo de (2013). http://www.msc.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/pdfs/3_leg.pdf.
- [50] Laboratoire des technologies de l'énergie (LTE), North American Test Procedures and Calculations for Residential Heat Pumps with Combined Space and Domestic Hot Water Heating. [En línea] 10 de Octubre de (2013). http://www.annex28.net/pdf/Annex28_N62.pdf
- [51] Burnett, A.A., Analysis of Thermal Energy Collection from Precast Concrete Roof Assemblies, Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University (2004).
- [52] Blumsack, S., J. Brownson y L. Witmer, Efficiency, Economic and Environmental Assessment of Ground-Source Heat Pumps in Central Pennsylvania, Department of Energy and Mineral Engineering, The Pennsylvania State University, University Park.
- [53] Iga, L.J., E.A. García y H.R. Fuentes, Efecto de la Variación de la Densidad del Aire en la Temperatura Bajo Condiciones de Invernadero, *Ciencia UANL*, Vol. IX, No. 3, Septiembre (2006).
- [54] Fuentes, C.L., Integración de un Sistema de Generación Distribuida Utilizando Técnicas de Optimización Uniobjetivo, Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica-División de Estudios de Posgrado, UMSNH (2012).
- [55] Departamento de ingeniería Energética y Fluidomecánica, Termodinamica Tecnica y Transmision de Calor, Exergía, Universidad de Valladolid.

- [56] Cengel, A.Y. y M.A. Boles, Termodinamica, Sexta Edicion, Mac Graw Hill, pp 429-492 (2009).
- [57] Moran, J.M. y H.N. Shapiro, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, Fifth Edition, pp 29-315 (2006).
- [58] Sanchez, V.R., M.L. Diaz, H. Mendoza y R.T. Hinojosa, Magic at Maguarichic, Comisión Federal de Electricidad (Morelia, México), Abril (2003).
- [59] Watts, M.J. y R.E. Chapman, Engineering Economics, Chapter 7, Third Edition, Section Five (2002).
- [60] Ngugi, P.K., What does Geothermal Cost?-the Kenya Experience, Short Course Geotherm. Dev. Geotherm. Wells, pp 1-13 (2012).
- [61] Dickson, M. y M. Fanelli, What is Geothermal Energy, Pisa Italia.
- [62] Nazif, H., E. Conservation, and M. Resources, Feasibility of Developing Binary Power Plants in the Existing Geothermal Production Areas, No. 29 (2011).
- [63] Tsatsaronis, G. y M. Park, On Avoidable and Unavoidable Exergy Destructions and Investment Costs in Thermal Systems, Energy Conversion & Management, 43, 1259-1270 (2002).
- [64] Kelly, S., G. Tsatsaronis y T. Morosuk, Advanced exergetic analysis: Approaches for Splitting the Exergy Destruction into Endogenous and Exogenous.
- [65] Yamankaradeniz, N., New Exergetic Parameters for Advanced Exergetic Analysis of a Geothermal District Heating System, Uludag University, Bursa, Turkey.
- [66] Perez, R.H. y M.P. Cortes, Simulación y Control de la Temperatura Dentro de un Invernadero, Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería de Diseño y Automatización Electronica, Universidad de la Salle, Bogota (2007).
- [67] . Mungier, D.,. Manufacturers of Absorption and Adsorption Technology. s.l. : Tecsol S.A, 25 Mayo (2006).
- [68] Brizela, R. y otros cinco autores, Propuesta para la Mejora del Material en La Empresa de Fabricacion de Hielo Hilotec C.A. Mediante la Aplicación del Estudio de Ingeniería de Metodos, Universidad Nacional Experimental Politecnica, Republica Bolivariana de Venezuela, Marzo (2010).

-
- [69] Unex, Fundamentos de Refrigeracion. [En Línea] 10 de Junio de (2013). <http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tema7.pdf>
- [70] Comaina, Frio Comercial. [En Línea] 10 de Junio (2013). www.comania.com.
- [71] Lienan, P.J. y B.C. Lunis, Geothermal Direct Use Engineering and Desig Guidebook, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology (1991).
- [72] Santamouris, M., G. Mihalakakous, C.A. Balaras, J.O. Lewis, M. Vallidras y A. Agiriou. Energy Conservation in Greenhouses With Buried Pipes, Energy, Vol. 21, No. 5, pp 353-360 (1996).
- [73] Teitel, M., I. Segal, A. Shklyar y M. Barak, A Comparison between Pipe and Air Heating Methods for Greenhouses, 72, 259-273 (1999).
- [74] Bartzanas, T., Tchamitchian y C. Kittas, Influence of the Heating Method on Greenhouse Microclimate and Energy Consumption, Biosystems Engineering, 91(4), 487-499 (2005).
- [75] Tecna. Manual de Aerotermos Tecnatherm Series AC y ACE. [En línea] 20 de Mayo de (2013). www.tecna.es.
- [76] Secretaria del Trabajo y Prevención Social, Construcción, Equipamiento y Operación de Invernaderos, 2ª Edición, México (2009).
- [77] Munters, Calentadores de Aire. [En Línea] 10 de Octubre de (2013). [http://www.munters.com/upload/Related %20product %20files/GA %20Hanging %20Air %20Heater](http://www.munters.com/upload/Related%20product%20files/GA%20Hanging%20Air%20Heater.pdf)
- [78] Fundación Produce Sinaloa, A.C., Curso de Produccion de Hortalizas Bajo Invernaderos, Memoria del Curso.
- [79] Requejo, L.R., L.E. Bocardo y H.G. Osuna, Producción y Calidad de Tomate bajo el Sistema de Cultivo sin Suelo, Profesores Investigadores UAAAN, Directora de Sociedad de Prod. Rural "Calli" (2003).
- [80] ICAMEX, Manejo Agronómico para la Producción de Jitomate en Invernadero, Gobierno del Estado de Mexico.
- [81] Garza, A.M., y M.M. Velázquez, Manual para la Producción de Tomate en Invernadero en Suelo en el Estado de Nuevo León, Sagarpa, Junio (2008).

- [82] Idea, Guía Técnica Agua Caliente Sanitaria, [En Línea] 20 de Octubre de (2013). www.idae.es
- [83] Energuia, Factores Clave en la Elección de un Acumulador de A.C.S. [En Línea] 25 de Octubre de (2013). www.energuia.com
- [84] Msssi, Sistemas de Agua Caliente Sanitaria. [En linea] 12 de Noviembre (2013). https://www.msssi.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/pdfs/3_leg.pdf
- [85] Mopc, Reglamento y Construcción de las Instalaciones Sanitarias en Edificaciones. [En Línea] 17 de Noviembre (2013). <http://mopc.gob.do/media/6043/R-008%20INSTALACIONES%20SANITARIAS.pdf>

Apéndice A

Tecnologías para la generación de electricidad apartir de recursos de baja temperatura

A.1. Tecnología ORC

El sistema ORC de baja temperatura aprovecha el calor de la tierra o el calor residual de algún proceso para hacer funcionar una turbina, convirtiendo un recurso renovable en una potencia eléctrica sin emisiones. Esta solución energética modular puede operar en un amplio rango de temperaturas del recurso, empezando a temperaturas tan bajas como 91°C. Ofrece importantes ventajas, y en el último bucle de reciclaje todo el agua puede ser devuelta a la tierra para su recalentamiento y reutilización. La utilización de una fuente renovable y fiable nos permite prescindir de la dependencia del petróleo, gas natural, viento fuerte o tiempo soleado, sin el sacrificio de los valiosos recursos del agua. La Tabla [A.1](#), muestra algunos fabricantes y características de estos ciclos.

A.2. Ciclo Kalina

El ciclo Kalina, el cual es más eficiente que los ciclos convencionales de Rankine, pero de un diseño más complejo. Este ciclo utiliza como fluido secundario una mezcla de agua y amoníaco, el cual se expande (en condiciones de sobrecalentamiento) a través de las turbinas de alta presión y después es recalentado antes de accionar las turbinas de baja presión. Una manera simple de ver el ciclo Kalina es que utiliza una mezcla de agua y amoníaco para

Cuadro A.1: Lista de fabricantes de plantas ORC.

Fabricante	Potencia	Eficiencia eléctrica	Temperatura	Fluido	Tecnología
ORMAT 980 Greg Street Sparks, Nevada 89431- 6039 USA	0.2-7.5 MW	No Específica	No Específica	No específica	No específica
Turboden s.r.l. Viale Stazione, 23 25122 Brescia-Italy	0.3-2 MW	16 %–18 %	Sobre 280°C	Aceite de silicón	Turbina radial de dos etapas
GMK GmbH Reuterstraße 5 18211 Bargeshagen	0.05-2 MW	9 %–21 %	>120 °C Cuando utiliza motor	No específica	Hasta 500 kW motor Mayor a 500 kW turbina
Köhler und Ziegler Anlagentechnik GmbH Auweg 10 c 35457 Lollar	70-200 kW	11 %	100°C	Hidro-carburos	Motor
Ergion GmbH Bruchhäuser Str. 19 68723 Schwetzingen	4-300 kW	13 %–16 %	120°C a 300°C	Base agua con aditivos	Motor modificado
ADORATEC GmbH Rotterdammer Str. 20-30 68219 Mannheim	300-1750kW	15 %–18 %	>100°C	No específica	Turbina
WSK Energie und Umwelttechnik GmbH Linxer Straße 26 77694 Kehl–Leuteshem	52 a 65 kWe Depende de la temperatura de agua de enfriamiento	Promedio de 16.3 %	El enfriamiento de gases de escape 490 a 175 °C	Fluórico Hidro-carburos	Motor

Cuadro A.2: Fabricantes de ciclos Kalina.

Fabricante	Dirección	Dirección web
Exorka International Ltd	Landsberger strade 368, Munich 80687, Germany.	www.exorka.com
M+W Zander GmbH	Lottebergstr, 30, 70499, Stuttgart, Germany.	www.mwzander.com
Cryostar	2 Rue del'Industrie, ZI BP48 68220 Hesingue, France.	www.cryostar.com

obtener los principios del ciclo de vapor convencional en el que se hierve el agua, convertida en vapor sobrecalentado y luego se expande a través de una turbina de vapor, antes de ser condensa de nuevo.

Algunos investigadores creen que un desarrollo significativo en la elección de los fluidos de trabajo para un ORC es el ciclo de Kalina.

Los cuatro principales puntos de diferencia entre los ciclos Kalina y ORC son:

- La mezcla agua amoniaco tiene un punto de vaporización variable al contrario de los fluidos de trabajo en un ciclo de Rankine.
- Las propiedades térmicas del fluido de trabajo pueden ser alteradas variando el cambio de amoniaco a agua. Por ejemplo, puede tomarse ventaja de la variación estacional en la temperatura de los residuos de la temperatura externa con un cambio de uno a otro.
- El fluido agua amoniaco combinado permite un cambio en temperatura sin cambiar el contenido de calor del fluido.
- Finalmente debido al bajo punto de congelación del amoniaco a 195 K, pueden usarse disipadores a temperaturas más bajas para mejorar el ciclo de Carnot.

Factores del diseño de planta que deben ser considerados para la optimización de la mezcla incluyen la presión de entrada de la turbina, la temperatura de sobrecalentamiento y del condensador. Estas variables pueden causar conflictos cuando se selecciona el cambio optimizado, así que deben tomarse decisiones para la optimización de la mezcla. La Tabla A.2, muestra algunos fabricantes del ciclo Kalina.

Apéndice B

Tecnologías para la generación frío y formas de producirlo

B.1. Máquinas de absorción

B.1.1. Máquinas de simple efecto

La mayoría de los fabricantes ofrecen máquinas de simple efecto en el rango de 100 kWf a 5.2 MWf. Estas máquinas pueden funcionar con vapor entre 2 y 3 bares manométricos, (135 - 205 kPa) que corresponde a una temperatura del vapor entre 110 a 120 °C. Alternativamente, pueden funcionar también con agua caliente con temperaturas de entre 90 y 130 °C y una presión máxima de 9 bares. El coeficiente de operación (COP) se encuentra en el rango de 0.6 a 0.7. Como dato general, el consumo de vapor de una máquina de simple efecto es aproximadamente 2.3 kg/h por cada kWt. El flujo de agua caliente se encuentra en el rango de 30 a 73 kg/h por cada kWf dependiendo de la caída de temperatura permitida [1]. La Figura B.1, muestra un esquema simplificado de una máquina de simple efecto.

B.1.2. Máquinas de doble y triple efecto

Las máquinas de doble efecto están aproximadamente en el mismo rango de capacidad que las máquinas de simple efecto. El vapor es el medio preferido para activar estas máquinas y debe estar entre 9 y 10 bares manométricos (1,100 - 1,200 kPa), el cual corresponde a temperaturas en el rango de 175 a 185 °C. También existe la posibilidad de activar una máquina de doble efecto con agua caliente, cuya temperatura debe estar en el rango de 150 a 180 °C. El coeficiente de operación se encuentra en el rango de 0.9 a 1.2 y el consumo de vapor

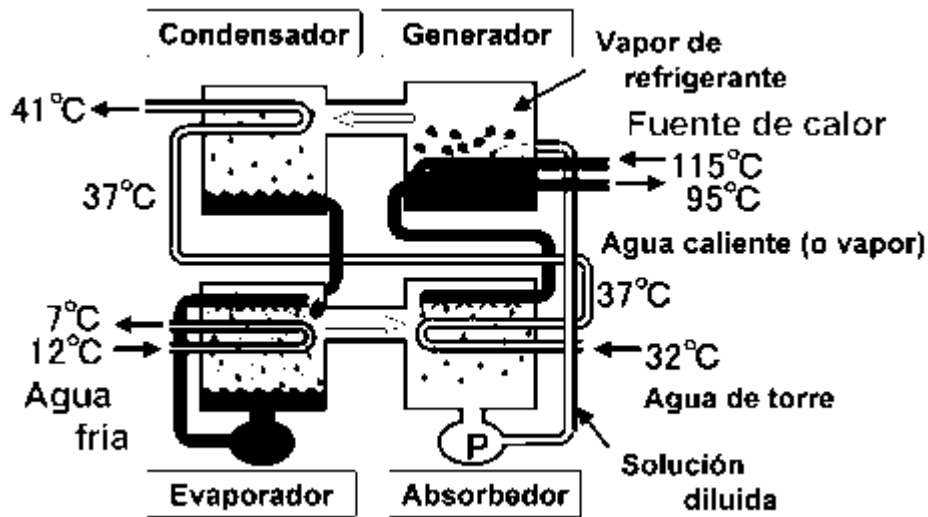


Figura B.1: Esquema simplificado de una máquina de absorción de simple efecto [66].

de una máquina de doble efecto es aproximadamente 1.4 kg/h por kWf. Existen enfriadores de triple efecto pero son máquinas que se encuentran en etapa experimental, las máquinas pueden alcanzar un COP de 1.6 y operar con temperatura de activación en el rango de 170 a 200 °C [1]. La Figura B.2, muestra un esquema generalizado de una máquina de absorción de doble efecto.

B.1.3. Coeficiente de operación (COP)

La eficiencia térmica es medida por el COP, que es la capacidad de enfriamiento sobre el calor suministrado para activar el enfriador. Los enfriadores de simple efecto tienen COP típicos de alrededor de 0.7 y los de doble efecto tienen un COP de 1.1 [1].

B.1.4. Pares de trabajo

En la práctica se usan comúnmente los sistemas agua-amoniaco y Bromuro de litio-agua:

B.1.4.1. Agua-amoniaco ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$)

Donde el agua es el absorbedor y el amoniaco es el refrigerante. Este es más utilizado para aplicaciones de refrigeración con temperaturas de evaporación, por debajo de 0 °C. Con este sistema se pueden alcanzar temperaturas de hasta - 60 °C.

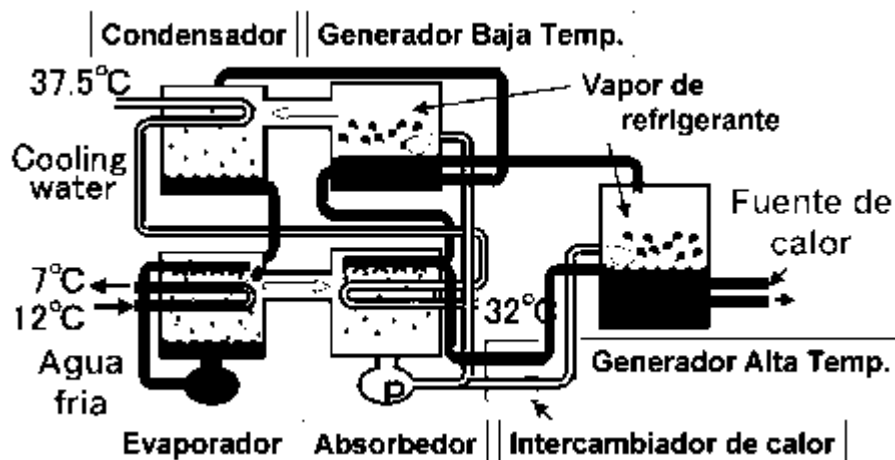


Figura B.2: Esquema simplificado de una máquina de absorción de doble efecto [66].

Cuadro B.1: Fabricantes de máquinas de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.

Fabricante	Dirección web
Flamingo Chillers	www.flamingochillers.com
Colibri-Stork	www.colibri-bv.com/
Robur	www.robur.com
Carrier	www.carrier.es

En lo que respecta a los costos de inversión y mantenimiento de las máquinas de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, se encuentran en el rango de 543.80 USD $\$/\text{kWf}$ y 1360 USD $\$/\text{kWf}$ [1]. Por otra parte son pocos los fabricantes de este tipo de máquinas. La Tabla B.1, muestra los fabricantes existentes de enfriadoras de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ (en 2009) [43] y [66] .

B.1.4.2. Bromuro de litio-agua ($\text{LiBr- H}_2\text{O}$)

Donde el bromuro de litio es el absorbedor y el agua actúa como refrigerante. Este sistema es muy aplicado para aplicaciones de enfriamiento de aire o donde no es necesario enfriar por debajo de 0 °C. Con el par de trabajo $\text{LiBr- H}_2\text{O}$ se pueden obtener temperaturas de hasta +5 °C.

Los costos y mantenimiento de las enfriadoras de $\text{LiBr- H}_2\text{O}$, varían dependiendo de la ubicación de la instalación, tiempo de operación, etc., y tienen dos componentes: un costo fijo como función de la potencia, y por un costo que es función de la energía producida. El coste del inversión está en el rango de 410.43 a 820.86 USD $\$/\text{kW}$ (en 2008) y los costos por energía producida están en el rango de 1.37 a 8.21 USD $\$/\text{MWh}$. Para torres de enfriamiento el costo de operación es de 4.10 USD $\$/\text{MWh}$ [1].

Cuadro B.2: Fabricantes de máquinas de absorción BrLi-H₂O.

Fabricante	Dirección web
Carrier	www.carrier.es
York (Johnson Controls Inc.)	www.johnsoncontrols.com
Trane	www.trane.com/Commercial
McQuay	www.mcquay.com
Yazaki	www.yazakienergy.com/
Sanyo	www.heatpumpcentre.org/
Hitachi	www.hitachi.com.ph/
Mitsubishi	www.heatpumpcentre.org/
Kawasaki	www.khi.co.jp/corp/kte/EN
Thermax	www.thermaxindia.com
Entropie	www.entropie.com/en/
LG Machinery	www.heatpumpcentre.org/
Kyung Won Century	www.century.co.kr:8080
Broad	www.broad.com

Cuadro B.3: Propiedades del hielo y del agua .

Propiedad	Agua	Hielo
Calor latente de fusión	-	335 kJ/kg
Densidad	1000 kg/m ³	920 kg/m ³
Viscosidad	1.793 10 ⁻³ kg/ms	-
Conductividad térmica	0.5619 W/m°C	1.88 W/m°C
Calor específico	4.18 kJ/kg	2.04 kJ/kg°C

Los fabricantes de este tipo de máquinas, se muestran en la Tabla B.2. La mayoría de éstos fabricantes listados ofrecen máquinas con capacidad de enfriamiento en el rango de 100 kWf - 1,000 kWf [43].

B.2. Producción de hielo y características

El hielo es agua sólida cristalizada, congelada. Es uno de los tres estados naturales del agua. El agua, junto con el galio, bismuto, ácido acético, antimonio y el silicio, es una de las pocas sustancias que al congelarse aumentan de volumen (es decir, que disminuye su densidad); la mayoría de las otras sustancias se contraen al congelarse [67]. La Tabla B.3, muestra algunas propiedades del hielo.

Una ventaja de la refrigeración con hielo se presenta especialmente en los vegetales o en productos que tienden a perder masa (debido a la deshidratación) y llegan a ser menos atrac-

tivos en apariencia, además que es económico de producirse para algunas aplicaciones entre estas tenemos: productos marinos, aves, procesamiento de vegetales frescos, para banquetes y fiestas, el negocio de los químicos, del concreto, además de ventas y la industria de venta de alimentos.

B.2.1. Formas de producirlo

En el hielo, como en la mayoría de los sólidos, las moléculas se acomodan en una formación ordenada. Sin embargo, dependiendo de las condiciones de presión y temperatura, es posible que adopten diferentes formas de ordenarse, lo que origina diferentes tipos de hielo [68]. Básicamente existen dos formas de hacer el hielo, a saber, el hielo húmedo y el hielo seco. Hielo seco significa hielo a temperaturas bajas, lo suficiente para prevenir que las partículas se tornen en humedad; el término no se refiere a dióxido de carbono sólido. En general, el hielo subenfriado seco se produce en plantas que remueven mecánicamente el hielo de la superficie enfriadora; muchas de las plantas de hielo en escamas son de este tipo. Cuando la superficie enfriadora del evaporador es calentada por algún mecanismo de descongelamiento para desprender el hielo, la superficie del hielo se humedece y, a menos que el hielo esté subenfriado bajo cero, 0 °C, permanecerá húmedo en el cuarto de almacenamiento; el hielo tubular y las planchas de hielo son de este tipo.

Otra clasificación más común es de acuerdo al tipo que la planta produce [69], de ahí que tenemos:

- Hielo en Bloque.
- Bloque de hielo rápido.
- Hielo en escamas.
- Hielo tubular.
- Hielo en placas.
- Hielo troceado.

B.2.2. Fabricación del hielo a nivel industrial

En forma general, el hielo se fabrica de la siguiente manera: el agua es tratada para quitar durezas, lo que determina el color y la dureza (menos dureza mas transparencia). Luego, el

agua es circulada por una caldera lo que determina el tamaño del hielo. En el tanque de la caldera (que también contiene los tubos verticales) se expande un gas que puede ser amoníaco previamente comprimido, al expandirse el gas la temperatura desciende en la caldera lo que hace que el agua que está circulando en los tubos verticales se comience a congelar desde afuera hacia adentro , una vez que el caudal del agua casi se queda en cero debido a la obstrucción de los tubos por congelamiento del agua, se deja de meter el gas (amoníaco) en la caldera , el gas es retirado por el compresor.

Finalmente; se introduce vapor de agua en la caldera y el hielo formado en los tubos verticales se desprende y cae sobre unas cuchillas giratorias que lo cortan en partes más pequeñas [67].

B.2.2.1. Modo de operación

El sistema debe ser flexible y permitir operar en función de las necesidades:

- Acumulación.
- Acumulación y producción directa.
- Desacumulación y producción directa.
- Desacumulación.
- Producción directa.

La Figura B.3, muestra los modos de operación y fabricación del hielo descritos anteriormente.

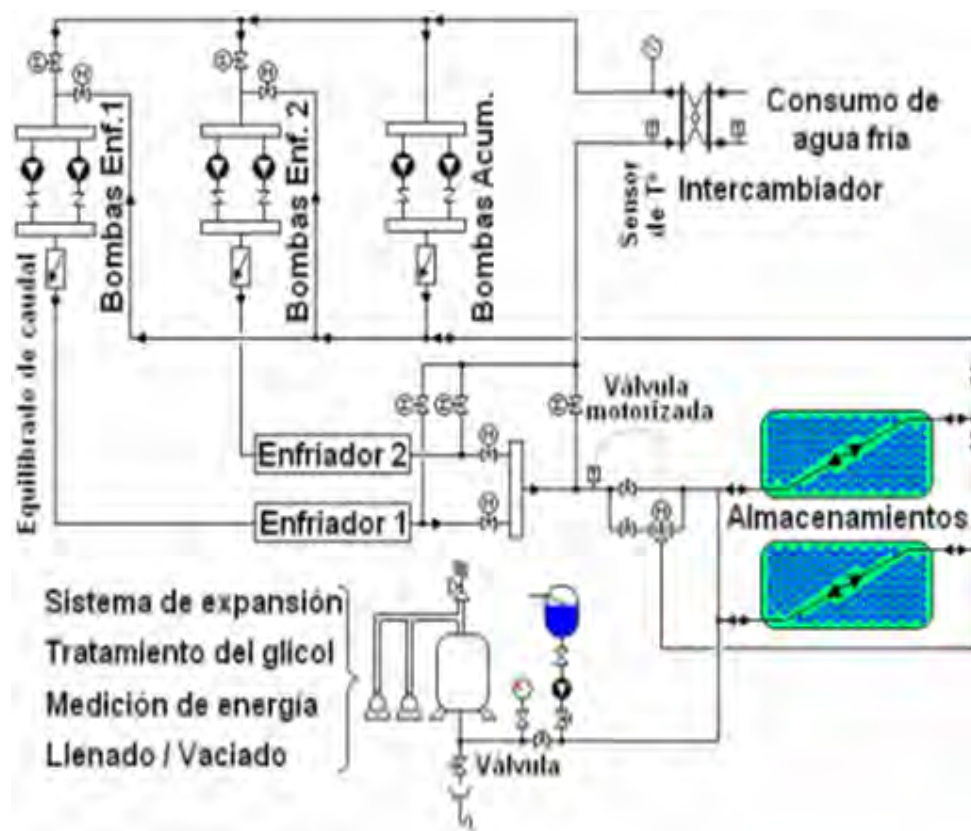


Figura B.3: Proceso de fabricación del hielo.

Apéndice C

Tecnologías para invernaderos y productos

C.1. Tecnologías para calefacción

Existen diferentes sistemas para aumentar y mantener la temperatura en el interior de un invernadero. Se recomienda la implantación de sistemas de calefacción artificial en aquellas zonas donde las temperaturas invernales sean bajas o para cultivos que requieran unas condiciones térmicas especiales.

C.1.1. Mediante suelo radiante

Este sistema implica generalmente usando el piso del efecto invernadero como un gran radiador. Tubos, a través del cual se hace circular agua, están enterrados en el suelo del invernadero. El calor del agua caliente se transfiere a través del tubo a la suelo y, finalmente, al aire en el invernadero [70].

Un sistema de calefacción de suelo se prefiere por muchos operadores porque da lugar a una uniforme distribución de la temperatura desde el piso al techo y no impida espacio o causa sombras. Sin embargo, su capacidad para suministrar el 100 % de la calefacción de un invernadero requiere un clima bastante suave y una baja temperatura de diseño interior. Esto es causado por la la naturaleza de la transferencia de calor en el sistema. Existen diferentes arreglos para tratar equilibrar esta temperatura, ver Figura C.1.

Si esta demanda de calor es demasiado grande para cubrir el área del suelo, los tubos se pueden montar en bucles dobles o el diámetro de los tubos se pueden aumentar. Por lo que

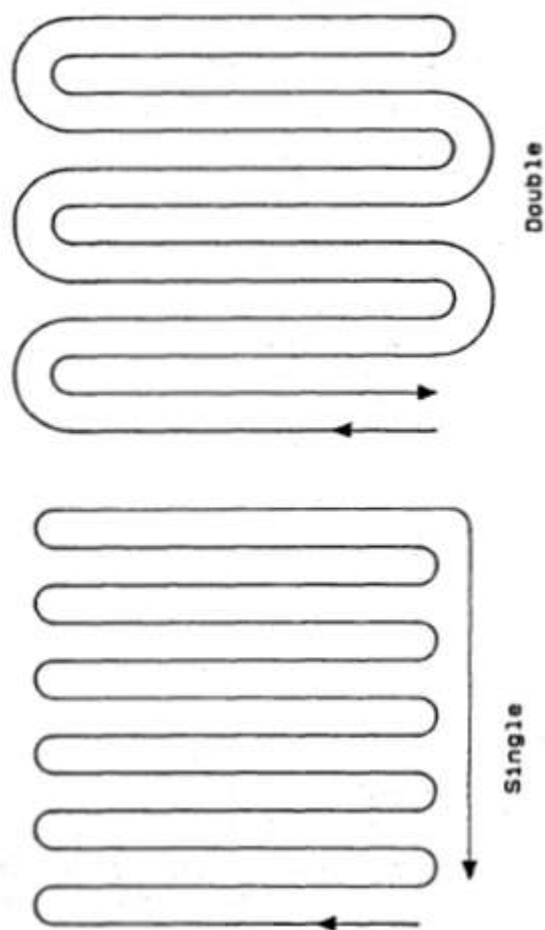


Figura C.1: Arreglos de tuberías en serpentin simple y doble.

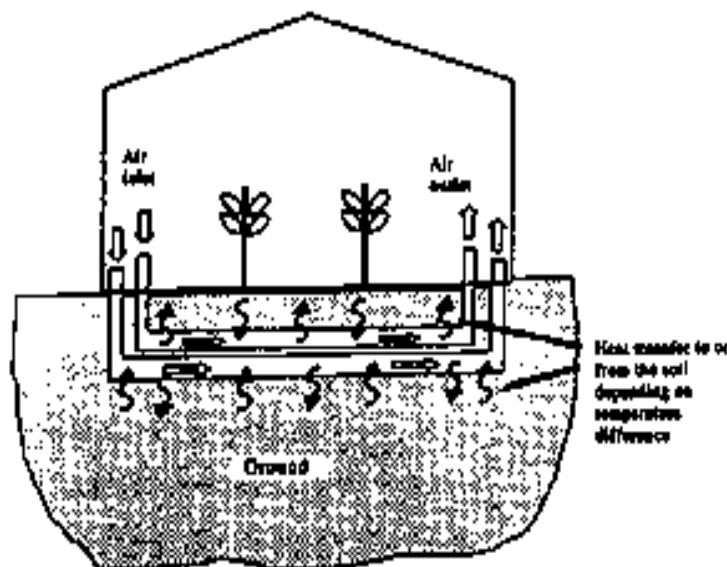


Figura C.2: Arreglo de un invernadero con tuberías enterradas [71].

el arreglo doble se aplica solo para mayores demandas de energía.

La temperatura de aire del invernadero también aumenta durante el invierno con el aumento de longitud de la tubería, la disminución de diámetro de la tubería, por lo que se aumenta la profundidad [71]. En la Figura C.2, se aprecia otro tipo de acomodo para mantener la energía en invernaderos.

Una variante de las tuberías enterradas es basado en tuberías áreas de aire caliente distribuidas en el invernadero, estas tuberías pueden ser ductos de polietileno perforados. La figuras C.3 y C.4, muestran algunas vista de estos acomodos [72].

Otra variante en el sistema de calefacción es un calentador de aire situado a unos metros por encima del suelo. Es decir que si las tuberías de calefacción enterradas en el suelo del invernadero no proporcionan el suficiente calor durante la noche que es cuando generalmente se requiere, se puede agregar un calentador dentro del invernadero para que disipe energía e incremente la temperatura de sus alrededores [73], ver Figura C.5.

C.1.2. Aerotermos

El arotermo es un intercambiador de calor de régimen gas-líquido que funciona mediante agua caliente, éste tipo de intercambiadore calienta el aire que se encuentra a sus alrededores ya que el aire es forzado a pasar por su superficie mediante un ventiladores. En la Figura C.6, se puede apreciar esquemáticamente un arotermo Tecnatherm.

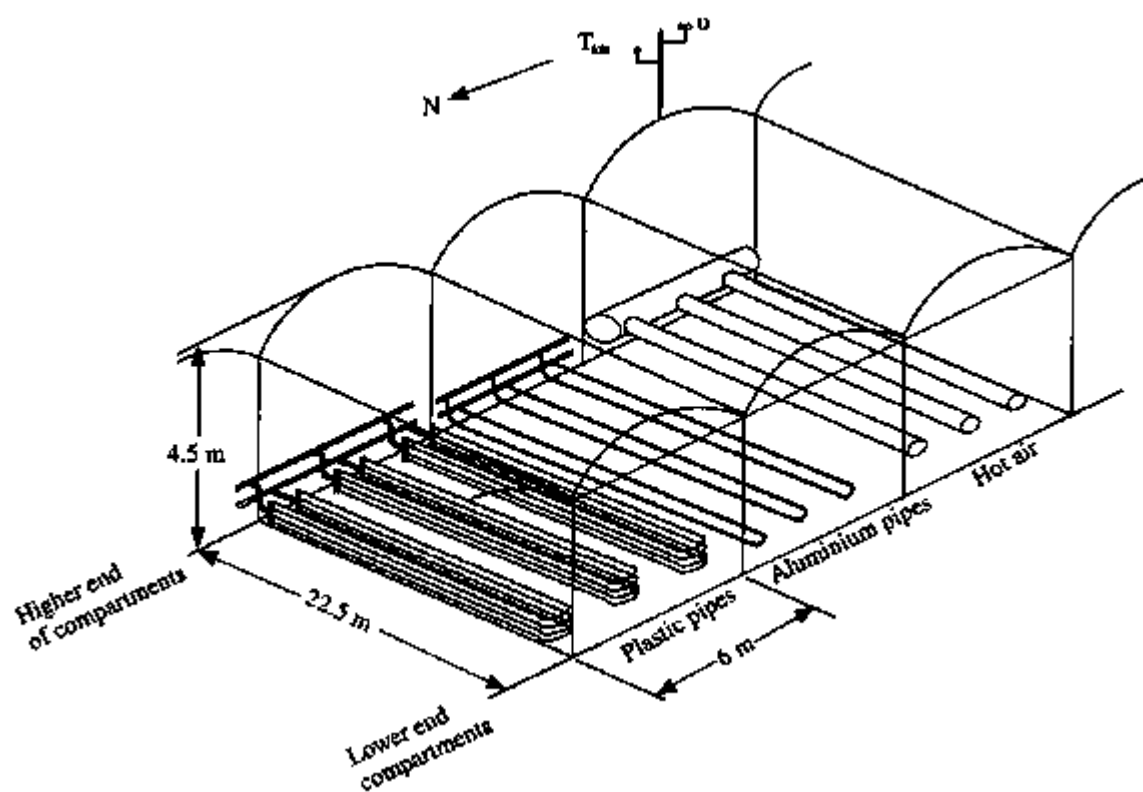


Figura C.3: Vista esquemática del invernadero [72].

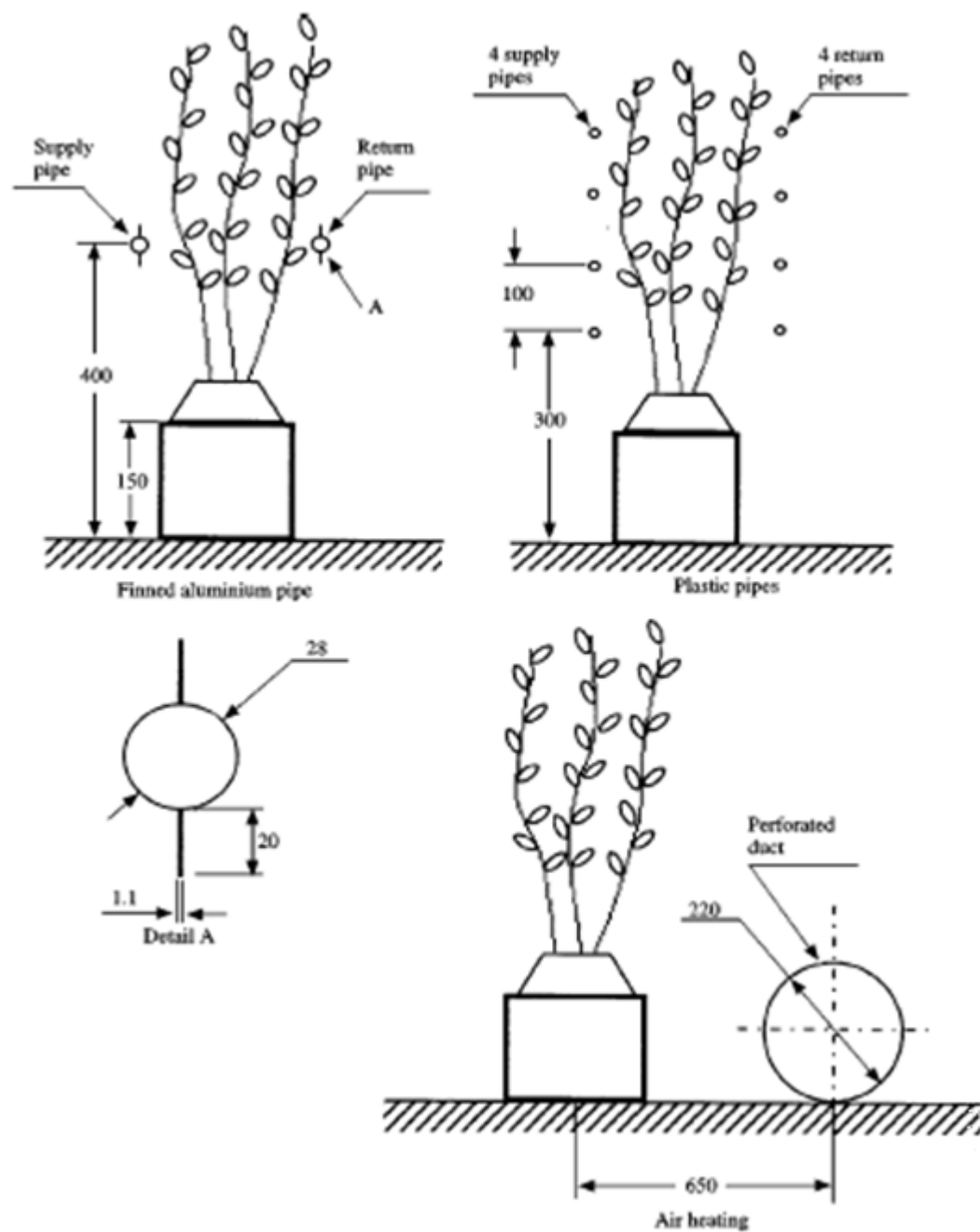


Figura C.4: Vista esquemática del posicionamiento de los ductos de calefacción. 312

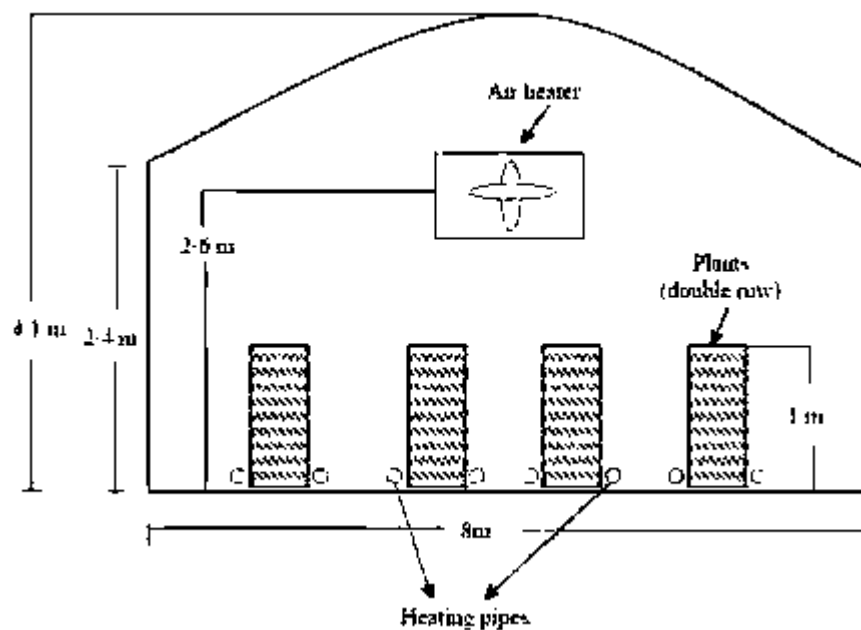


Figura C.5: Esquema de invernadero con calefacción de tuberías e intercambiador de calor.

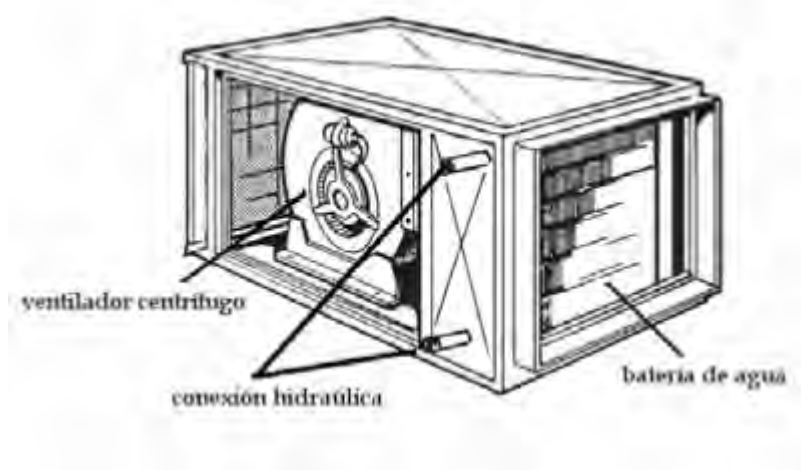


Figura C.6: Esquema de un aerotermino Tecnatherm [74].

Cuadro C.1: Características de diseño del aerotermo Tecnatherm [74].

Parámetro	Característica
Modelo	AC-12 de 1.5 c.v
Caudal de aire (m ³ /h)	7.000
Caudal agua (l/h)	3.130
Temperatura de entrada de aire	+10 °C
Potencia calorífica (kW)	72.7
Potencia frigorífica (kW)	14.8 *
Presión disponible (mm c.a)	20
Presión de carga batería (m.c.a)	0.25
Conexión de agua	1-1/8"
Alcance (m)	47
Dimensiones AxLxH (mm)	680x700x600

En la Figura C.6, se puede apreciar el esquema de un aerotermo Tecnatherm, ahora en la Tabla C.1, se muestran las características del intercambiador.

Como se puede apreciar en la Tabla C.1, el aerotermo es de una potencia calorífica no muy elevada por lo que se podrán instalar varios (en caso de elección de esta tecnología) para disipar la energía destinada para el conjunto de invernaderos.

C.1.3. Calentadores de aire para colgar (combustión)

Los calentadores de aire se utilizan para suministrar calor a un bajo costo y en una amplia variedad de aplicaciones: invernaderos, granjas, naves industriales, ver Figura C.7.

Todos los modelos se basan en el principio de calentamiento de gas directo [76], en el cual se usa un potente ventilador que hace que el aire pase por una cámara de combustión en la que está el quemador (ver Figura C.8). A medida que pasa el aire por el quemador, todo el calor que produce el proceso de combustión pasa a la corriente de aire. Esto hace que el calentador tenga una eficacia térmica del 100 %. El grado de calor del calentador se puede ajustar manualmente con una válvula reguladora.

Algunas características de la tecnología que aparece en la Figura C.8, se muestran a continuación:

- Eficacia térmica del 100 %.
- Ajuste manual del grado de calor.
- Fácil de instalar.



Figura C.7: Calefacción de invernaderos mediante calentadores de aire por combustión [75].



Figura C.8: Calentador de aire munters [76].

- Fácil de manejar.
- Funciona con GLP.
- Válvula solenoide doble para cortar el paso del gas.
- Interruptor de seguridad para evitar el sobrecalentamiento.
- Sensor de presión para detectar bloqueos en el paso del aire.
- Protección exterior de acero inoxidable y cámara de combustión.
- Equipo eléctrico alojado en caja de protección.

Debido a las características y al principio de funcionamiento (combustible fósil) este tipo de tecnología no podría ser aplicable al sistema en cascada. Sin embargo, se ilustra debido a la revisión de tecnologías aplicables a invernaderos.)

C.2. Tecnologías para construcción (tipos)

C.2.1. Tecnologías para invernaderos-México

El uso de invernaderos actualmente se justifica mediante la corriente mundial de calidad en la que estamos viviendo. Los mercados son cada vez más exigentes en calidad, inocuidad, presentación y certificación del contenido, ya que el cliente final observa las diferencias entre este tipo de producto que se presentan en los mercados con respecto a otros. Esto hace que los productos de invernadero estén en nichos de alto nivel.

La agricultura bajo invernadero es producto de las condiciones ambientales de países. En la actualidad el uso de esta tecnología está disponible para la mayor parte de los esquemas productivos y de los productores en general.

México, muestra un mosaico muy diverso de regiones y climas. Ubicado geográficamente dentro de las zonas tropical y subtropical del Hemisferio Norte, el clima en México está determinado por varios factores, entre los que se encuentran: la altitud sobre el nivel del mar, latitud, diversas condiciones atmosféricas y la distribución existente de tierra y agua. Por lo anterior, el país cuenta con una diversidad de climas, los cuales de manera muy general pueden clasificarse, según su temperatura, en cálido y templado; y de acuerdo con la humedad existente en el medio, en húmedo, subhúmedo y muy seco.

Las condiciones anteriormente señaladas sólo son algunas de las que forman parte de la gran diversidad de factores a considerar que existen en México; todos ellos bien definidos tanto en mapas climáticos como cartográficos [77].

C.2.2. Cronología de adopción de tecnología para invernaderos en México

En México, los primeros invernaderos con interés comercial fueron instalados en la región oriente del Estado de México. Entonces sus construcciones eran de concreto, herrería y cristal.

A finales de los 70, la COPLAMAR (Comisión para el Desarrollo de las Zonas Marginales) promovió el uso y construcción de invernaderos, sobre todo de estructura de madera y cubierta de películas de plástico. Asimismo, se iniciaron proyectos empresariales como Rossemex, Summa, Flora y otros, los cuales adoptaron otras tecnologías basadas en la fibra de vidrio y estructuras metálicas.

En la década de los 80, se presenta un auge en el desarrollo de los invernaderos, principalmente para floricultura, viverismo y producción de plántulas de hortalizas. Desarrollo que se basa en la construcción de estructuras multicapilla a dos aguas con ventila cenital tipo colombiano.

Para la década de los 90, ya existen todo tipo de invernaderos en México, que adoptan avances e innovaciones tecnológicas de vanguardia consistentes en el uso de invernaderos con estructuras de materiales más ligeros con cubiertas de plástico en sustitución del vidrio, sistemas sencillos de control climático-automatizado y equipos de riego automatizado con fertirrigación.

Es a partir del 1995, durante la etapa de crisis económica generada por la devaluación ocurrida en México, cuando se presentan las condiciones oportunas para la inversión en producción hortícola bajo invernadero, y cobran gran interés entre los mayores productores de hortalizas.

En los últimos años, los productores nacionales requieren de mayores avances en lo referente a controles y automatización de operaciones en invernaderos.

C.2.3. Tecnología mexicana

En este contexto, Asesores en Construcción y Extensión Agrícola S.A. de C.V. viene participando desde 1980 con diseños, desarrollos y adaptaciones de las diferentes tecnologías usadas en el mundo. Para ello se toman en cuenta factores climáticos específicos del lugar

donde se realizará la instalación para que sean económicos y de eficiencia operativa que resuelvan las necesidades específicas de los productores según su región. Para cada proyecto es necesario estudiar todos los factores que intervendrán en el proyecto: desde lo climático, hasta vías de comunicación, preparación y disponibilidad de mano de obra.

Entre los diseños de invernaderos que han estado en continua evolución, destacan para medianas y grandes superficies los modelos Vertitúnel, Baticenital, Batisierra, Star Grow y casa de sombra.

En el diseño de estos invernaderos se considera el uso de perfiles estructurales de acero y lámina con recubrimientos de zinc. Esto garantiza durabilidad a la estructura. Así mismo, se utilizan secciones tubulares cuadradas, troqueladas y estrechadas; tornillería y accesorios que facilitan el montaje de la estructura, que reducen los costos.

El análisis estructural considera las siguientes normas nacionales:

- Instituto Mexicano para la Construcción en Acero (IMCA), basado en las normas del American Institute for Steel Construction (AISC).
- Manual de diseño de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (Sección C-14), la cual define las condiciones de viento y sismo a considerar de acuerdo a la ubicación de la estructura dentro de la República Mexicana.

Ambos documentos (IMCA y CFE) complementados con las normas National Institute of Agricultural Engineering, UK y las normas UNE 76-208-92 permiten lograr diseños y un nivel de análisis comparable al existente en países con mayor tecnología.

En los análisis para diseño se toma en cuenta lo siguiente:

- Peso propio de la estructura.
- Viento de diseño de 120 km/h. (el cual puede ser modificado de acuerdo a requerimientos específicos de la región).
- Peso del cultivo (18-25 kg/m², o variable (dependiendo del tipo de cultivo).
- Peso producido por granizo.
- Cargas durante el montaje de la estructura.
- Sismo. Esto cuando se ubique en zona sísmica y contemple cultivo sobre tutoreo.



Figura C.9: Invernadero vertitúnel.

C.2.4. Principales modelos de invernaderos de acuerdo a la zona y al cultivo

Modelo Vertitúnel

Invernadero sencillo de gran resistencia; se ajusta a casi todo tipo de terreno sin tener problema con la ventilación; muestra ser un invernadero muy versátil en cuanto a la producción. Se recomienda ampliamente para floricultores y viveristas, aunque ya ha sido utilizado por productores de hortalizas, que incluye otros materiales para el soporte de éstas. La Figura C.9, muestra un invernadero modelo vertitúnel.

Modelo Batitúnel

Este invernadero carece de una ventila cenital, ver Figura C.10. Esto lo limita a su número en batería, pero que es muy útil cuando la superficie se quiera aprovechar al máximo en climas templados; sin embargo, se puede tener problemas con la ventilación en la parte interna de la nave cuando la nave tenga en uno de sus lados más de 30 m.

Si se presentan bajas temperaturas, el calefactor Centinela 250 es una alternativa, ya que la generación de 250, 000 BTU por hora son suficientes para solucionar heladas.

Modelo Baticenital

Es un invernadero con ventila cenital que permite una gran eficiencia en la ventilación y ha mostrado un buen comportamiento en climas templados, cálidos y tropicales. La estructura, basada en perfiles cuadrados galvanizados y cables de acero, proporciona una resistencia óptima a los vientos, soportando el tutoreo del cultivo. Con sus arcos compuestos por dos



Figura C.10: Invernadero batitúnel.

secciones, además de ser aerodinámico, cuenta con una ventila cenital. Presenta buen drenaje mediante un canalón estructural. En la Figura C.11, se muestra un invernadero modelo baticenital.

Modelo Batisierra

Este invernadero presenta buena resistencia y con una ventilación novedosa, principalmente por su forma de sierra, lo que da su nombre; tiene un buen comportamiento en climas templados, cálidos y tropicales; además de esto, es de muy fácil armado y con buena capacidad de carga (hasta de 25 kg/m^2). Cabe destacar en este modelo la utilización de un elevador para el tensado del plástico; también se puede poner una doble capa de polietileno, el cual puede ofrecer una mejor climatización del recinto. En la Figura C.12, se aprecia un invernadero tipo batisierra.

Modelo Megavent

Este invernadero (ver Figura C.13) es muy recomendable para zonas tropicales y muy cálidas, debido principalmente a las ventilas cenitales y laterales; es un invernadero muy resistente, recomendado en zonas con vientos muy fuertes: puede resistir hasta 120 km/h .

La ventilación en este invernadero no es problema: sus ventilas cenitales le permiten una excelente aireación al cultivo, sin problema alguno.

Modelo Star Grow

Es un invernadero completamente automatizado; cuenta con un excelente sistema de ventilación y ha mostrado un buen comportamiento en climas que van de templado a cálido con todas sus variantes. Tiene buena capacidad de carga de 25 kg/m^2 . Ambas ventilas (cenitales



Figura C.11: Invernadero baticenital.



Figura C.12: Invernadero batisierra.



Figura C.13: Invernadero megavent.

y laterales) se operan automáticamente con un sistema de motoreductores, ejes, cremalleras, engranes, relevadores y controladores, aunque también cuentan con un sistema de operación manual. En la Figura C.14, se muestra un invernadero modelo Star Grow.

Casa sombra

Es una protección para mejorar las condiciones climáticas de un área de cultivo. El elemento fundamental son las mallas que se utilizan como cubierta y puede variar la densidad de sombra, e inclusive se pueden utilizar mallas anti-insectos.

Se puede utilizar este tipo de estructura en lugares donde el daño causado por viento es muy importante, reduce la evapotranspiración y evita el ingreso de gran cantidad de insectos.

Se está utilizando para producir intensivamente en regiones donde los problemas son más de tipo sanitario que climático, ya que en este tipo de invernadero no se puede controlar los factores climáticos como la lluvia. La Figura C.15, muestra un invernadero del tipo casa sombra.

Anteriormente fueron mostrados los tipos de invernaderos más comunes como algunas de sus características. A continuación la Tabla C.2, muestra otro tipo de denominación para invernaderos como ciertas características y uso de los mismos.

Algunos Fabricantes de los tipos de invernaderos citados anteriormente son ilustrados en la Tabla C.3.



Figura C.14: Invernadero Star Grow.



Figura C.15: Invernadero casa sombra.

Cuadro C.2: Características, cultivos y precios para diferentes tipos de invernaderos.

TIPO	CARACTERÍSTICAS	PRINCIPALES TIPOS DE CULTIVO	PRECIO (\$/m ²)
Macrotunel	Estructura ligera de acero galvanizado, no tiene paredes frontales ni laterales, estructura móvil, para zonas templadas y vientos máximos de 25 a 55 km/h.	Berries: Fresa, zarzamora, frambuesa y arándano. Otros: flores, nopales y viverismo.	35 - 60
Casa Sombra	Estructura metálica ligera, mallas antiáfidos en cubiertas y en perímetro, incluye sistema de tutorio (de 20 a 30 kg/m ²), resiste de 80 a 120 km/h.	Hortalizas: Tomates, pepinos, pimientos, berenjenas, melones, picosos, lechugas, flores, follajes y viverismo.	80 - 110
Inv. Climas Tropicales	Estructura de invernadero con ventilación cenital fija, ventilación perimetral con mallas, cubiertas en techumbres con polietileno y ventanas con malla antiáfidos, resiste de 80 a 120 km/h.	Hortalizas: Tomates, pepinos, pimientos, berenjenas, melones, picosos, lechugas, flores, follajes y viverismo.	210 - 250
Inv. Climas Templados	Ventila cenital fija, ventana cenital manual, ventana perimetral manual, sistema de riego localizado con inyección de fertilizante manual, para climas templados y fríos, resiste de 80 a 120 km/h.	Hortalizas: Tomates, pepinos, pimientos, berenjenas, melones, picosos, lechugas, flores, follajes y viverismo.	280 - 350
Inv. Cualquier Clima	Ventana cenital fija, ventana cenital motorizada, ventanas perimetrales motorizadas, incluye automatización, sistema de riego localizado con inyección de fertilizante automático, resiste de 100 a 120 km/h.	Hortalizas: Tomates, pepinos, pimientos, berenjenas, melones, picosos, lechugas, flores, follajes y viverismo.	380 - 490

Cuadro C.3: Fabricantes de invernaderos.

Invernaderos	Dirección web
Iverca	www.invercagroup.com
Ininsa	www.ininsa.es
Imaas	imaas_invernaderos@hotmail.com
Ulma	www.ulmaagricola.com
Acea	www.acea.com.mx



Figura C.16: Aspecto de la producción de tomate bajo invernadero.

C.3. Producción de jitomate

De las diversas hortalizas que se explotan a nivel nacional, el tomate es la más importante, tanto por su superficie de siembra, como por el valor de su producto; además es una planta que tiene un rango de adaptabilidad muy amplio ya que se cultiva en clima templado y tropical de casi toda la República Mexicana. Las técnicas de producción son muy variables y en los últimos años ha tomado auge hacerlo bajo condiciones de invernadero (ver Figura C.16) e hidroponía (cultivo sin suelo), con el fin de obtener mayor rendimiento y calidad, por lo que los países desarrollados ven en ella una alternativa económica para automatizar y programar su agricultura intensiva, principalmente en aquellos cultivos que se cotizan en el mercado, como hortalizas, flores y plantas de ornato [78]. La producción de jitomate en invernadero tiene como objetivo principal lograr altos rendimientos por unidad de superficie, así como una excelente calidad, a través del control y manejo de la nutrición vegetal, el riego, la temperatura, la luz, la humedad, la ventilación, la aplicación de bióxido de carbono, las densidades de siembra, la genética (híbridos) y siempre mantener el cultivo libre de maleza, plagas y enfermedades [79].

C.3.1. Temperatura

El jitomate es una planta termo periódica diaria, es decir, requiere una oscilación de temperatura entre el día y la noche de entre 8 y 12 °C, que favorece su crecimiento y formación de mayor numero de frutos.

La temperatura óptima oscila entre los 22 y 24 °C, y varía en función de cada una de sus etapas fenológicas. Para germinación requiere 25 °C, en crecimiento 20 °C, en floración 24 °C, en fructificación requiere 25 °C, y en maduración 22 °C.

Temperatura mínima 12 °C, y temperatura máxima 35 °C. Detienen su desarrollo debajo de los 12 °C, se hiela la planta a -2 °C. La temperatura óptima del suelo es de 20 °C.

Los principales efectos biológicos y anatómicos de temperatura en las etapas fenológicas son: en crecimiento, valores mayores a 35 °C, las hojas son pequeñas y los tallos son delgados, el crecimiento cesa y la fotosíntesis se deprime: en floración, a 13 °C se acorta el número de entrenudos sobre el que desarrolla el primer racimo floral, valores menores de 15 °C la floración se detiene, pero se aumenta el número de flores por inflorescencia, temperaturas mayores a 30 °C, se reduce el crecimiento del tubo polínico, provocando esterilidad y una polinización insuficiente y aborto de flores: en fructificación, valores mayores a 29 °C, los frutos son pequeños, menor número, mas ácidos pero menor cantidad de ácido absorbico, mala calidad, temperaturas menores de 10 °C en la noche y mayores de 22 °C producen escasa fructificación, temperaturas mayores de 32 °C se incrementa el número de flores abortadas, hay malformación de frutos a temperaturas mayores a los 30 °C, así como menores a los 13 °C. La formación del licopeno se incrementa de 22 a 26 °C. Para reducir el efecto negativo de las bajas temperaturas hay que aplicar la fitohormona auxina.

Para medir la temperatura dentro del invernadero de debe contar con un termómetro de máximas y mínimas. La temperatura del suelo, debe tener entre los 18 y 22 °C. El jitomate se desarrolla mejor al presentar una actividad fotosintética más alta, por tanto, mayor acumulación de materia seca, lo que significa más producción de frutos, es decir, alto rendimiento. Con valores de temperatura del suelo menores de 15 °C o mayores de 35 °C, el área foliar decrece hasta en un 50 % y por tanto, la actividad fotosintética disminuye y el contenido de materia seca decrece hasta un 70 %.

La temperatura del suelo debe tomarse a los 10 cm de profundidad, ya que el 63 % de las raíces del jitomate se encuentran en este espacio [79].

C.3.2. Aspectos generales a considerar en la producción de tomate en invernadero

Los productores que iniciarán con la siembra de tomate en invernadero deberán tomar en cuenta aspectos generales que son muy importantes para evitar un fracaso e incrementar las probabilidades del éxito en sus operaciones.

Disponibilidad de agua para riego

El primer paso que se debe dar, incluso para la planeación de la producción en invernadero, es asegurarse de contar con la suficiente cantidad y calidad de agua que se requiere para el cultivo a establecer. Además de la cantidad y calidad del agua de riego requerida, existen otros aspectos relacionados con el agua como por ejemplo: el sistema de riego a utilizar, la capacidad técnica de los operarios del sistema de riego.

Climatología de la localidad

Se debe tener en cuenta los factores climáticos de la región donde se quiere establecer el proyecto de invernaderos y la adaptación del cultivo en cuestión, a pesar de que podemos controlar algunas condiciones ambientales y tener muy claro que entre menos energía y equipamiento se necesite para el correcto desarrollo del potencial del cultivo, menor será el costo de producción y por lo tanto mayor será la utilidad para el productor. Dentro de este tema, algunos de los parámetros del clima que se analizan son: velocidad y dirección predominante del viento, temperatura máxima, mínima y promedio, humedad relativa nocturna y diurna del ciclo del cultivo, intensidad de luz y fotoperiodo en diferentes estaciones del año.

Estudio de mercado

Es importante analizar y evaluar lo que el mercado de consumidores está demandando en la actualidad. Además de saber producir, es importante definir que es lo que se quiere producir y que preferencias tienen los consumidores, para que al final de cuentas el producto elegido a establecer en el invernadero tenga la aceptación y gusto de los consumidores y se convierta en una actividad rentable para el productor.

Vías de comunicación

Los accesos principales al proyecto de invernaderos, así como las carreteras y rutas de destino de la producción son factores importantes a considerar en el desplazamiento de los embarques de producto terminado. La distancia entre la finca donde se produce y el cliente final es un aspecto a considerar al momento de definir el tipo de transporte a utilizar en el desplazamiento del producto empacado. Se puede embarcar vía aérea, marítima y más comúnmente se utiliza el transporte refrigerado terrestre.

Disponibilidad de mano de obra

Se requieren diez operarios para atender una hectárea de invernadero en el caso del cultivo de tomate bola cultivado en suelo, este requerimiento ya incluye la producción, cosecha y empaque del producto. El problema de la disponibilidad suficiente de mano de obra para la operación de proyectos de invernaderos ha limitado en algunas localidades el desarrollo de grandes parques de producción, por lo que siempre se tendrá presente evaluar este aspecto para definir la magnitud del proyecto a desarrollar.

Conocimiento técnico y administrativo

Una vez definidos y resueltos los aspectos anteriores también se deberá contemplar la parte técnica en lo referente al manejo correcto del cultivo en el invernadero y la capacitación correspondiente a los operarios del mismo. Dentro de este mismo tema, también se tendrá que incluir aspectos relacionados, como por ejemplo:

- La variedad ó híbrido de semilla a establecer.
- El costo del cultivo (ver Figura C.17).
- El destino de la producción.
- Comercialización.

Infraestructura

Cuando se plantea el desarrollo de un proyecto productivo de hortalizas en invernadero es muy común que se pasen por alto aspectos relevantes que sobre la marcha pueden sorprender debido al impacto económico que implican. Tales aspectos pueden ser los relacionados a infraestructura como:

- Máquinaria agrícola.
- Bodega para empaque.
- Almacén para agroquímicos y fertilizantes.
- Red de electrificación.
- Instalaciones sanitarias, baños, comedores, etc.
- Telefonía.
- Agua potable para el consumo de los trabajadores.

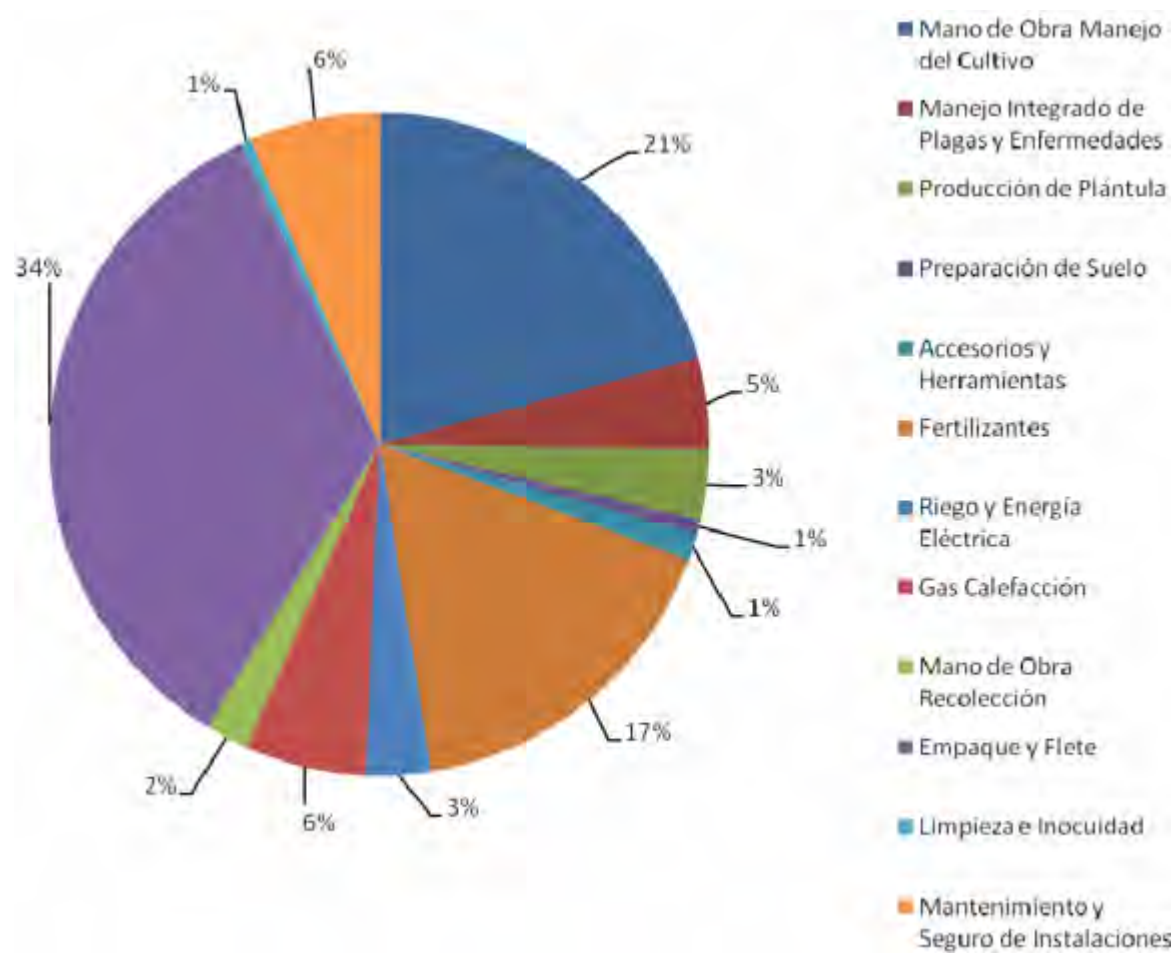


Figura C.17: Distribucion aproximada de precios en la produccion de tomate.

El cultivo en invernadero se justifica cuando las condiciones de campo abierto no son favorables para producir y se tiene una buena ventana comercial en la localidad. Sin embargo, para obtener la mayor utilidad debemos ser eficientes en el control del clima dentro de los invernaderos, esto se consigue mediante una adecuada selección del lugar, tipo de invernadero y su tecnología [80].

Apéndice D

Tecnologías y producción ACS

D.1. Producción ACS

Las instalaciones de producción centralizada de ACS habitualmente se integran en las de calefacción de los edificios.

El agua de consumo se lleva desde la instalación para suministro de agua del edificio hasta la sala con una derivación exclusiva para este uso. Una vez calentada el agua se distribuye por todo el edificio hasta los puntos de consumo, mediante una red de tuberías exclusivas para este servicio. Por la forma de producción del ACS se distinguen dos tipos de instalaciones, con o sin acumulación; respecto a las distribuciones todas las instalaciones son similares [81].

D.1.1. Producción instantánea

La característica más destacable de los sistemas de producción instantánea es que el diseño de los intercambiadores está condicionado al momento de máxima demanda de la instalación, pues el agua caliente se consume al tiempo que se demanda. Como elementos auxiliares estos sistemas requieren de bombas en el circuito primario, encargadas de hacer circular el agua de los colectores a los intercambiadores.

El componente básico de los sistemas de producción instantánea es el intercambiador, siendo los más habituales los intercambiadores de placas de acero inoxidable. La Figura D.1, muestra un esquema de producción instantánea de ACS.

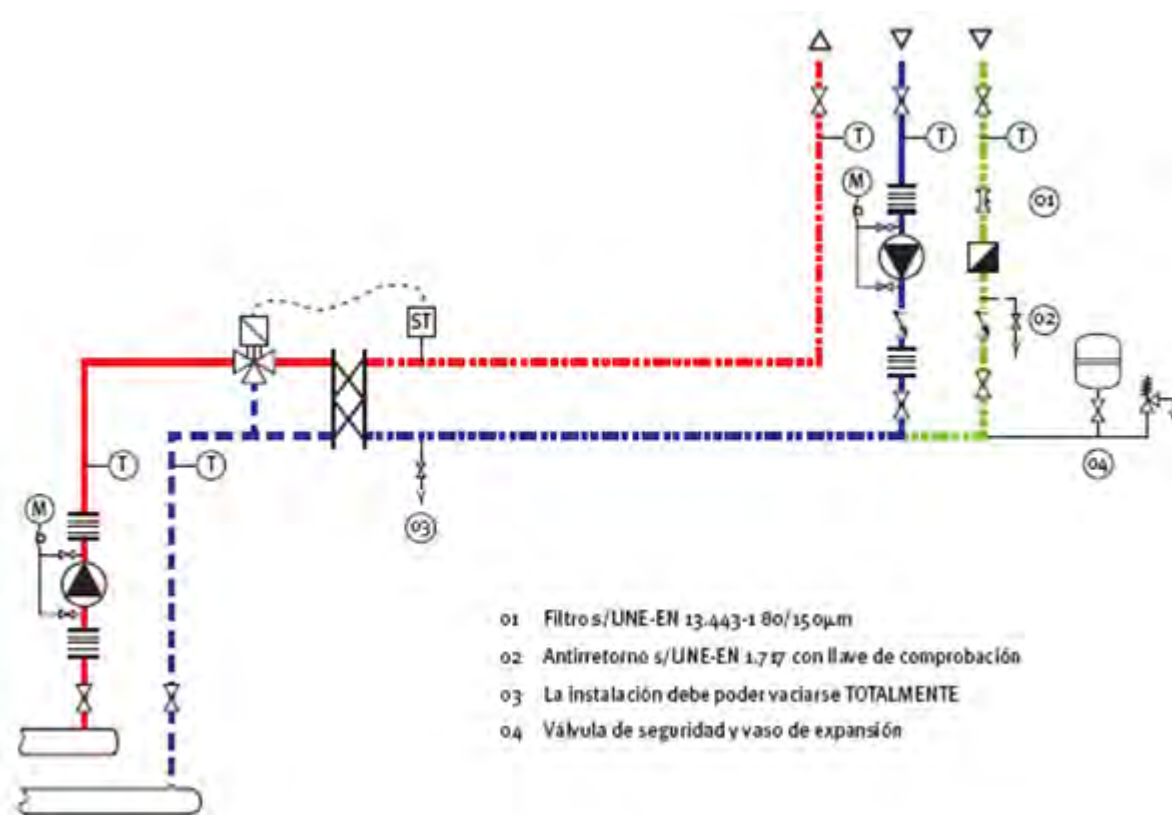


Figura D.1: Producción instantánea de ACS. Regulación en primario con válvula diversora.

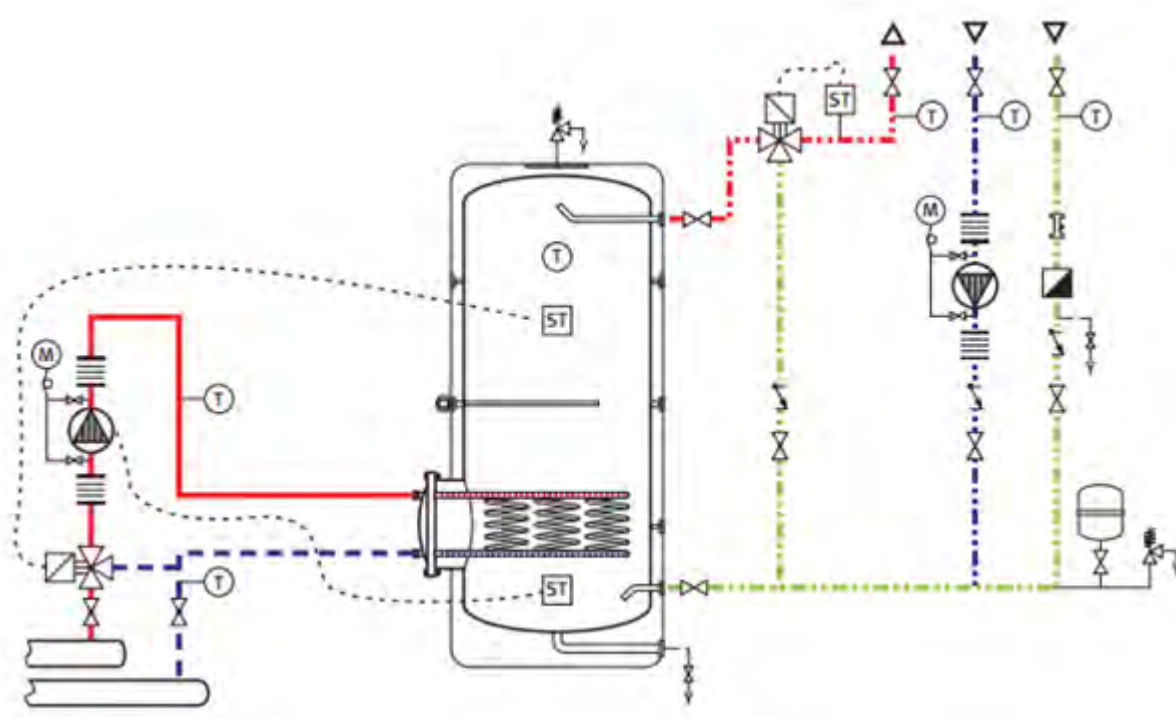


Figura D.2: Producción con interacumulador. Regulaciones en primario y secundario.

D.1.2. Producción con acumulación

Para reducir la potencia necesaria en producción y al mismo tiempo obtener funcionamientos más homogéneos de la instalación se utilizan los sistemas con acumulación en depósitos en los que se mantiene el agua caliente hasta el momento de su uso, de manera que en las puntas de demanda del edificio se utiliza el agua acumulada, solicitándose una potencia inferior a la del sistema de producción (ver, Figura D.2). Los sistemas de acumulación a su vez se clasifican, dependiendo del volumen de acumulación, en:

- Acumulación.
- Semiacumulación.

Los volúmenes de acumulación se diseñan para atender a la demanda punta con el agua acumulada, mientras que los de semiacumulación solo pueden hacer frente a una parte de esa demanda, requiriendo el apoyo de la producción para cubrir la punta completa [81].

Además de los intercambiadores, en esta forma de producción, los elementos básicos son los depósitos de acumulación; como se ha descrito anteriormente los mismos pueden ser interacumuladores, que incorporan el intercambiador, o sólo acumuladores. El uso de los interacumuladores debe limitarse a instalaciones pequeñas, ya que la potencia que proporcionan

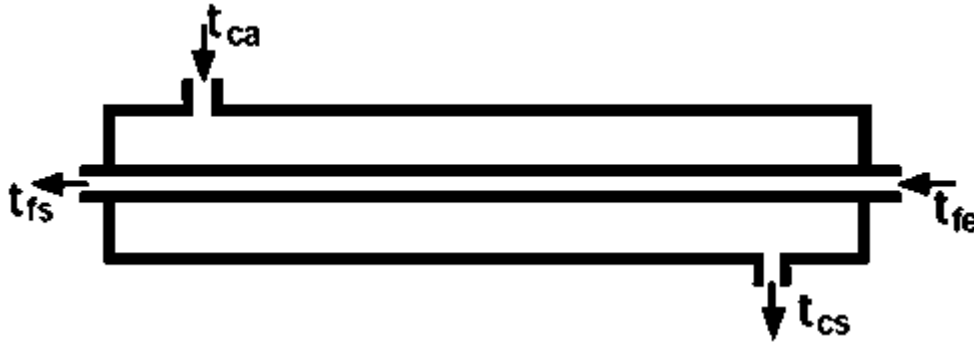


Figura D.3: Esquema básico de un intercambiador de calor.

está muy limitada por la superficie de intercambio, además presentan mayores problemas de limpieza que los depósitos acumuladores.

D.2. Tecnologías y fabricantes

D.2.1. Intercambiadores

El intercambio de calor entre dos corrientes de fluidos distintos es uno de los procesos más importantes y que encontramos habitualmente en calderas, calentadores, refrigeradores, etc., produciéndose el intercambio de calor entre un fluido caliente y otro frío. Los dispositivos en donde se produce este intercambio de calor, sin mezcla de ambos fluidos (Figura D.3), se conocen como "intercambiadores de calor" [82].

Cuando los dos fluidos entran por extremos distintos y circulan en dirección contraria, se conocen como "intercambiadores de calor contracorriente" o bien en flujo paralelo cuando circulan en la misma dirección (Figura D.5).

Con el fin de conservar las características sanitarias deben existir elementos que separen el agua de las calderas del agua de consumo; estos son los intercambiadores. Los intercambiadores son de dos tipos: tubulares y de placas.

D.2.1.1. Intercambiadores tubulares

Constan de un haz tubular por el interior del cual discurre el agua caliente primaria (calentada mediante calderas), colocado en el interior de una carcasa cilíndrica, por la que circula el agua a calentar (secundario ACS); el volumen de este cilindro es muy pequeño. Habitualmente el haz tubular, o serpentín, se coloca en el interior de un depósito de acumu-

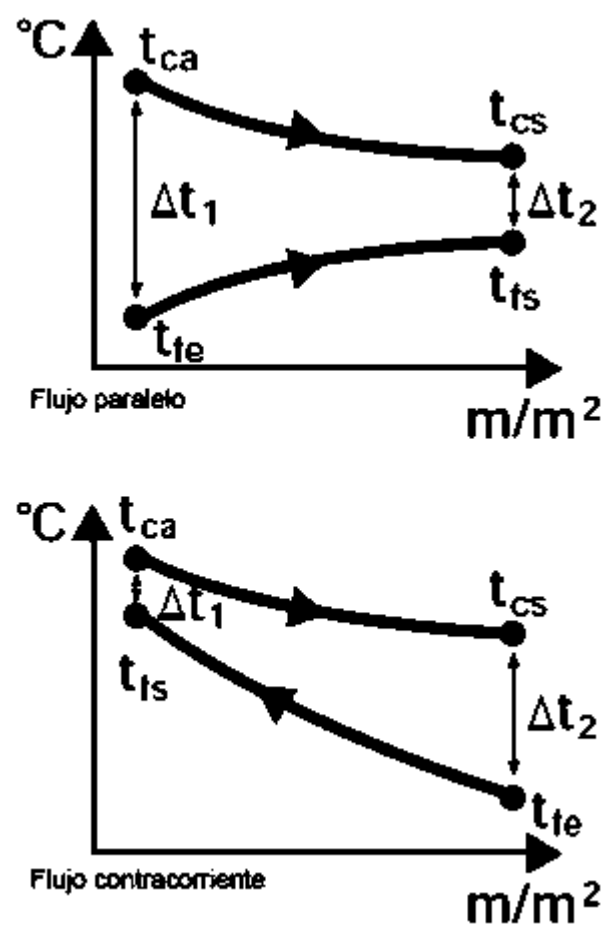


Figura D.4: Tipos de flujos en intercambiadores de calor.

lación, formando los denominados interacumuladores. Considerando que el material no debe afectar a las características de potabilidad del agua, estos intercambiadores por lo general son de acero inoxidable.

D.2.1.2. Intercambiadores de placas

Un intercambiador de placas está compuesto por:

- Conjunto de placas y juntas.
- Placa fija.
- Placa móvil.
- Guía de alineamiento.

La placa representa la superficie de intercambio térmico y es la esencia de este tipo de intercambiadores; la misma se obtiene por estampación en frío de una chapa metálica de espesor homogéneo. El diseño de corrugación de las placas determina sus características de transmisión de calor; cuando el intercambiador se cierra se crean los canales a través de los cuales circulan los fluidos primario y secundario. Los materiales más habituales de las placas son:

- Acero Inoxidable AISI 304.
- Acero Inoxidable AISI 316 L.
- Acero Inoxidable 254 SMO.
- Titanio.

Los fluidos son conducidos a través del intercambiador mediante las juntas. Cada placa posee una junta principal que rodea la periferia y dos juntas anulares que rodean los orificios de entrada y conducen alternativamente a los fluidos primario y secundario hacia las dos caras de la placa. Para las juntas se emplean los siguientes materiales:

- NBR (Nitrilo).
- EPDM.
- EPDM Prx.

- FPM (Vitón).
- HNBR.

El material de las juntas debe seleccionarse en función de las condiciones de operación del intercambiador.

La duración de un intercambiador de placas la determina la vida útil de las juntas, la cual viene dada por las condiciones de trabajo, teniendo suma importancia la temperatura de trabajo; la vida útil habitual es de 4 a 5 años, transcurridos los cuales se debe proceder a la sustitución de las juntas.

D.2.2. Depósitos

Los depósitos de acumulación de ACS pueden ser interacumuladores o acumuladores, según contengan o no en su interior al intercambiador. La característica más importante para su selección es el material con el que están fabricados, existiendo tres tipos fundamentales:

- Acero Inoxidable.
- Acero con tratamientos especiales, los más habituales con resinas epoxi.
- Acero con esmalte vitrificado, generalmente para pequeños volúmenes.

Otros aspectos básicos para su selección son la presión y la temperatura de trabajo. Atendiendo a los requisitos de presión a garantizar en los puntos de consumo establecidos en el documento.

La presión mínima de trabajo debe ser de 6 bar, siendo recomendable 8 bar. En cuanto a la temperatura de trabajo, atendiendo a los requisitos de prevención de la legionelosis, la misma no deberá ser inferior a 70 °C [83]. Los depósitos (Figura D.5) deben disponer de las siguientes conexiones:

- Entrada de agua de consumo con un deflector que la dirija hacia la parte inferior del depósito, de manera que se reduzca la zona de mezcla favoreciendo la estratificación del agua en su interior.
- Salida del ACS hacia consumo, situada en la parte superior del depósito.
- Vaciado en la parte inferior para la purga de lodos y para la toma de muestras para los análisis de legionela.

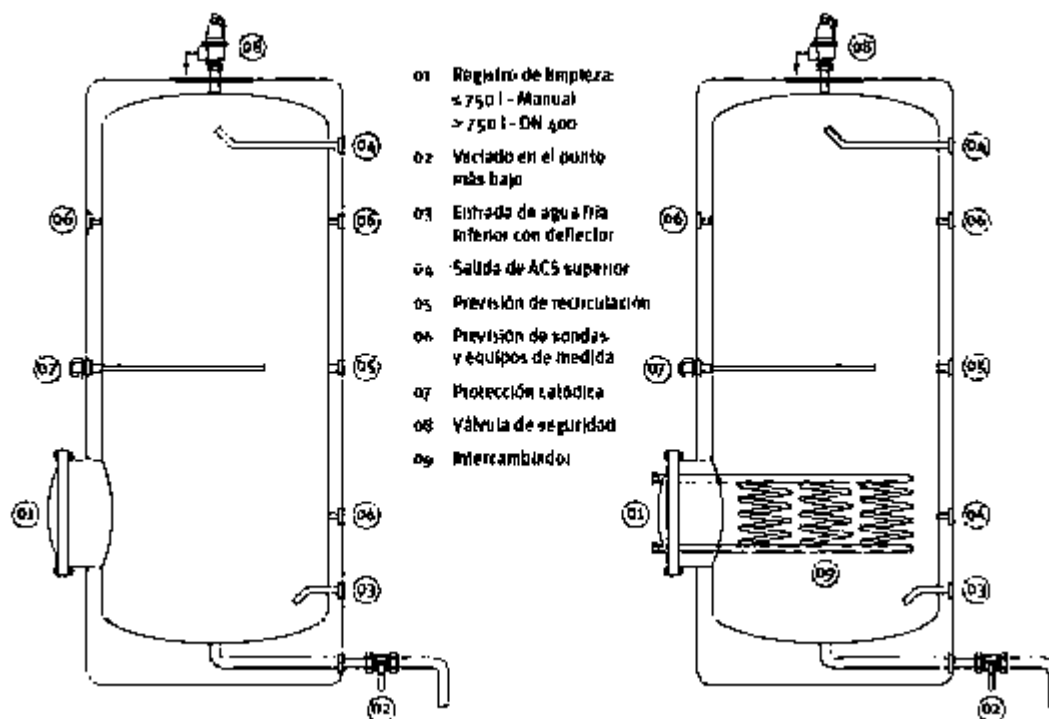


Figura D.5: Conexiones necesarias en acumuladores e interacumuladores.

- Registro para limpieza; para capacidades inferiores a 750 L se admiten tamaños de registro que permitan la limpieza interior manual; para capacidades superiores el tamaño mínimo del registro será DN 400, también denominado “Boca de Hombre” ya que permiten el acceso de una persona a su interior.
- Tomas para la conexión de los sistemas de producción, bien con intercambiadores exteriores de placas, o bien con serpentines interiores; estos últimos habitualmente tienen su acceso por la Boca de Hombre, a través de la cual pueden ser extraídos.
- Se requieren otras conexiones para sondas de regulación, termómetros, válvula de seguridad, recirculación de ACS, etc.
- Asimismo, por tratarse de equipos metálicos con riesgo de corrosión, suelen incorporar la posibilidad de protecciones catódicas.

Interacumuladores

Los hay de dos tipos: Los de doble envolvente, con una envolvente exterior al depósito por la que circula el agua de calderas, rodeando al acumulador; el conjunto se termina con un

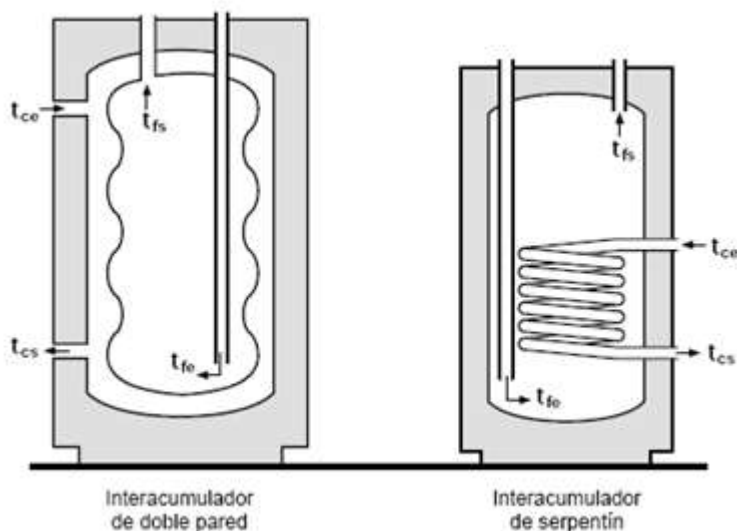


Figura D.6: Interacumuladores de serpentín y doble pared.

aislamiento exterior. Se utilizan exclusivamente en instalaciones pequeñas. Y los de serpentín interior, depósitos sencillos con el intercambiador tubular en su interior; existe una amplísima gama de capacidades, alcanzando grandes volúmenes.

Uno de los sistemas más utilizados en la preparación de ACS es mediante el interacumulador, calentado directamente por un fluido proveniente de un generador de calor [82].

Independientemente de cual sea la energía consumida por dicho generador de calor (gas, gasóleo, electricidad, etc.) nos referiremos a dos tipos básicos de interacumulador, cuya diferencia fundamental radica en el dispositivo de intercambio de calor. Esto es, interacumulador de doble pared e interacumulador de serpentín (D.6).

Ahora en la Figura D.7, se aprecia el principio de funcionamiento de un interacumulador [82].

Acumuladores

Únicamente almacenan el ACS, por lo que requieren un intercambiador exterior y una bomba que circule el agua a calentar entre el depósito y el intercambiador.

Existen dos grandes grupos de acumuladores de agua caliente sanitaria. Atendiendo a donde está ubicada la fuente energética y el intercambiador de calor se clasifican de la siguiente forma:

- Acumuladores directos.
- Acumuladores indirectos.
- Depósitos de Gas.

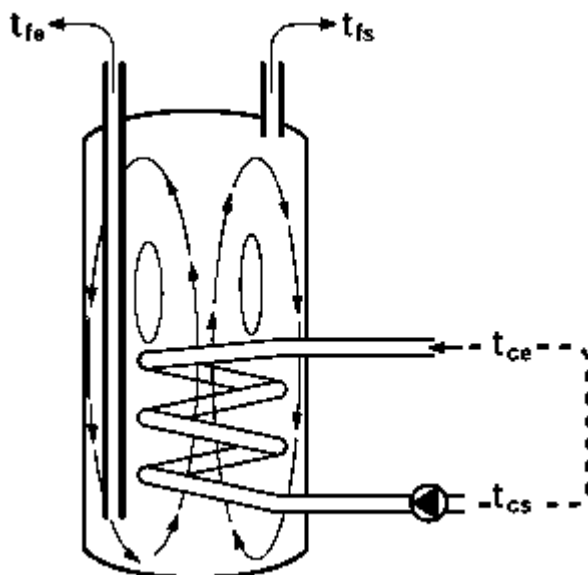


Figura D.7: Funcionamiento de un iteracumulador.

■ Depósitos inter acumulables

Los acumuladores directos contienen en su interior la fuente energética de calentamiento de ACS. Ésta será una resistencia eléctrica o un quemador de gas, dependiendo del tipo de que se trate. Los aparatos de este tipo poseen una clara desventaja, si tenemos en cuenta que tanto la resistencia como el quemador son de baja potencia, poseen tiempos de calentamiento elevados y no sirven para satisfacer consumos prolongados de ACS. Sólo sirven para los consumos punta, y una vez que el acumulador se vacía hay que esperar un tiempo sin usarlo hasta que el aparato se recupere. Los acumuladores indirectos deben ser conectados a una fuente energética externa, necesitando un intercambiador de calor adicional para el calentamiento del ACS.

Los intercambiadores poseen integrado en el mismo aparato el intercambiador (de ahí su nombre). Por el contrario, los depósitos acumuladores necesitan ser conectados a un intercambiador de calor externo para su funcionamiento. Dependiendo de la capacidad del intercambiador, el funcionamiento del depósito será mejor o peor.

La gran ventaja de los acumuladores indirectos es que con una fuente de calor y un intercambiador bien seleccionados pueden satisfacer tanto demandas punta de ACS como consumos prolongados, ya que no sólo poseen agua caliente acumulada, sino que también están calentando el agua de forma instantánea.

Cuadro D.1: Fabricantes de tanques ACS.

Fabricante	Dirección web
Salvador Escoda S.A.	www.salvadorescoda.com
Nibe-Therm	www.sotec.org
Ibaiondo	www.ibaiondo.es
Peisa	www.peisa.com.ar
Domusa	www.domusa.es
Dunphy	www.dunphycombustion.com
Adisa	www.adisa.es
Wolf	www.wolf-heiztechnik.de/es
Viessman	www.viessmann.es
Thermor	www.thermor.es
Termia	www.girotgeotermia.com
Climatécnica	www.climatecnica.com
Valliant	www.valliant.es

D.2.3. Fabricantes de depositos para ACS

Anteriormente se mostraron algunas características de los tanques de ACS. A continuación se muestran en la Tabla D.1, algunos fabricantes de este tipo de depósitos.

En caso de requerir información sobre instalaciones sanitarias en edificaciones se puede consultar [84].