



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE**  
**SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS  
DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO  
DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

**CRISTIN VAZQUEZ HERRERA**

ASESORES:

DOCTOR EN INGENIERÍA MECÁNICA  
J. JESÚS PACHECO IBARRA

DOCTOR EN INGENIERÍA MECÁNICA  
CRISANTO MENDOZA COVARRUBIAS

TRABAJO APOYADO POR EL CONSEJO  
NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

MORELIA, MICHOACÁN, AGOSTO DE 2015



*COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA  
APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA*

**DEDICATORIA**

A DIOS por darme la vida.

A MIS PADRES porque este trabajo es un pequeño fruto de todo lo que ellos han sembrado, por que sea para ellos un motivo de alegría y satisfacción, que vean reflejado un poco de todo su esfuerzo y dedicación, que a válido la pena sus preocupaciones, sus sacrificios, sus desvelos y sobre todo su AMOR hacia mí.

A MIS HERMANOS porque ellos han sido las bases para la obtención de este logro, que me han brindado su apoyo, sin dudarlos, en cada etapa que eh recorrido de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A DIOS que me ha dado la dicha y la fortuna de estar logrando un triunfo más en mi vida.

A MIS PADRES que me han dado su apoyo de manera incondicional, que me han brindado todo su cariño y han sido el cimiento principal de mis logros.

A MIS HERMANOS que han sido para mí un ejemplo, de unión, de esfuerzo, de lucha y de perseverancia día a día.

A MI ASESOR, el Dr. J JESÚS PACHECO IBARRA por confiar en mí, por brindarme su amistad, por transmitirme parte de sus conocimientos y experiencias, por ser el pilar fundamental de este trabajo, que en todo momento me brindó su apoyo, sin dudar, en cada cosa realizada de mi maestría.

A MI COASESOR, el Dr. CRISANTO MENDOZA COVARRUBÍAS por su ayuda en el trayecto de este proyecto, por compartir conmigo sus experiencias, por todos sus comentarios hechos, porque en cada momento impulso para alcanzar la meta fijada.

A MIS SINODALES, la Dra. ALICIA AGUILAR CORONA, el M. HUGO CUAUHTEMOC GUTIERREZ SANCHEZ, el M. RAÚL ALBERTO SANCHEZ VELASCO que me dedicaron de su tiempo y me compartieron de sus conocimientos a través de todos sus comentarios, no solo a este proyecto, sino a varios de mis trabajos realizados durante mi maestría.

Al Dr. CARLOS RUBIO MAYA que siempre tuvo un momento para escuchar y atender mis dudas, que me dio su apoyo y confianza en la realización de varias de mis actividades dentro y fuera de la escuela.

A MIS COMPAÑEROS que me han permitido el compartir con ellos días de alegrías, de preocupaciones y sobre todo de mucha enseñanza.

A CONACYT por el apoyo económico durante el desarrollo de este proyecto.

# COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

## RESUMEN

La integración de diferentes fuentes de energías renovables ha venido cobrando mayor relevancia en los últimos años. Un ejemplo de la integración de diferentes fuentes de energías renovables con propósitos de generación de energía eléctrica es la integración de la energía solar con la energía geotérmica de media y baja entalpía; tal es el caso de la planta desarrollada en el campo geotérmico de Simirao, Michoacán, por la UMSNH con apoyo de proyectos de Estímulos a la Innovación y Desarrollo Tecnológico de CONACYT vinculados con el sector productivo el cual consta de un ciclo binario de 300 kW y dos campos de colectores solares, cilindro parabólico y fresnel lineal, con un fluido de trabajo de características geotérmicas de media o baja entalpía.

El propósito de este trabajo es presentar la comparación técnico-económica de estas tecnologías de concentración solar: colectores cilindro parabólicos y fresnel lineal, tanto de una manera teórica como de una manera experimental, aprovechando las instalaciones de la planta anteriormente mencionada, para poder estimar la tecnología más factible bajo un conjunto de condicionantes específicas, como pueden ser, el área de captación, el área de recepción, las condiciones atmosféricas y las condiciones de operación.

**Palabras Clave:** Energía solar, energía geotérmica, colectores cilindro parabólicos, colectores fresnel, eficiencia óptica, eficiencia térmica.

## ABSTRACT

The integration of different sources of renewable energy has acquired greater importance in recent years. An example of the integration of different sources of renewable energy with purposes of generation electrical energy is the integration of the solar energy with geothermal energy of medium and low enthalpy; such is the case of the plant development in the geothermal field of Simirao, Michoacán, by the UMSNH with support projects stimulus to innovation and technological development of CONACYT linked with produced sector which comprises a binary cycle of 300 kW and two fields of collectors solar, parabolic cylinder and lineal fresnel, with a work fluid of characteristics geothermal of medium or low enthalpy.

The purpose of this work is to present the technical and economic comparison of these solar concentration technologies: parabolic cylinder collectors and lineal fresnel, both a theoretical way of an experimental way, using the facilities of the aforementioned plant, as can be, concentration area, receiver area, weather conditions and operation conditions.

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA  
APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

CONTENIDO

RESUMEN .....	4
ABSTRACT.....	4
<b>CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	11
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	13
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.4 JUSTIFICACION.....	13
1.5 HIPÓTESIS .....	14
1.6 METODOLOGÍA.....	14
<b>CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES.....</b>	<b>16</b>
2.1 ENERGÍA.....	16
2.2 ENERGÍAS RENOVABLES .....	17
2.2.1 ENERGÍA HIDRÁULICA .....	18
2.2.2 ENERGÍA EÓLICA.....	20
2.2.3 BIOMASA .....	23
2.2.4 ENERGÍA MARINA .....	24
2.2.5 ENERGÍA SOLAR.....	26
2.2.6 ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	36
2.3 ANTECEDENTES DEL PROYECTO .....	40
<b>CAPITULO 3 REGIÓN GEOTERMICA Y ANALISIS TÉRMICO .....</b>	<b>43</b>
3.1 REGIÓN GEOTÉRMICA DE ESTUDIO.....	43
3.2 CONDICIONES METEREOLÓGICAS .....	44
3.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS CAMPOS SOLARES.....	51
3.3.1 CAMPO DE COLECTORES CILINDRO PARABÓLICOS.....	51
3.3.2 CAMPO DE COLECTORES FRESNEL LINEALES .....	52
3.4 RENDIMIENTO ÓPTICO .....	54
3.4.1 COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO .....	54
3.4.2 COLECTOR FRESNEL LINEAL.....	58
3.5 RENDIMIENTO TÉRMICO .....	59
3.5.1 COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO .....	60
3.5.2 FRESNEL LINEAL.....	66
<b>CAPITULO 4 EXPERIMENTACIÓN .....</b>	<b>70</b>
4.1 DESCRIPCIÓN.....	70
4.2 PROCEDIMIENTO DE MONTAJE.....	72
4.3 PRUEBAS .....	79
<b>CAPITULO 5 RESULTADOS.....</b>	<b>90</b>
5.1 TÉCNICOS.....	90
5.2 ECONÓMICOS.....	106
<b>CAPITULO 6 CONCLUSIONES.....</b>	<b>109</b>

*COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA*

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>115</b>
ANEXO I .....	115
ANEXO II .....	117
ANEXO III .....	120

# COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

## Lista de Figuras

<i>Figura 1. Impacto ambiental de formas de producir electricidad.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2. Esquema de una central hidráulica .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3. Central eoloeléctrica de la Venta II.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4. Distribución del recurso potencial eólico.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 5. Esquema de una central de biomasa.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 6. Potencial energético del oleaje en el océano pacífico.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7. Energía global anual consumida por humanos .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 8. Concentradores de discos parabólicos .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 9. Concentradores con torre de concentración.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 10. Concentradores cilindro parabólico.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 11. Concentradores fresnel lineal.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 12. Radiación global media diaria en México.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 13. Estructura de la tierra.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 14. Factibilidad de recursos geotérmicos en México .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 15. Campo de colectores fresnel.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 16. Planta hibrida geotérmica solar en Simirao, Michoacán.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 17. Vista aérea de la planta. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 18. Colectores fresnel (Kimberlina).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 19. Colectores de la planta SEGS.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 20. Mapa geológico generalizado en la zona geotérmica de Araro .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 21. Gráfica de temperatura ambiente de abril 2015.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 22. Gráfica de temperatura ambiente de mayo 2015.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 23. Gráfica de temperatura ambiente de junio 2015 .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 24. Grafica de presión atmosférica de abril 2015 .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 25. Gráfica de presión atmosférica de mayo 2015 .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 26. Gráfica de presión atmosférica de junio 2015.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 27. Gráfica de velocidad del viento de abril 2015.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 28. Gráfica de velocidad del viento de mayo 2015.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 29. Gráfica de velocidad del viento de junio 2015 .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 30. Gráfica irradiación solar de abril 2015 .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 31. Gráfica irradiación solar mayo 2015 .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 32. Gráfica irradiación solar junio 2015.....</i>	<i>50</i>

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Figura 33. Campo de colectores cilindro parabólicos .....	51
Figura 34. Colector power trough 110.....	52
Figura 35. Campo de concentradores fresnel lineales .....	52
Figura 36. Colector power F22 .....	53
Figura 37. Diagrama de flujo para cálculo de parámetros del colector parabólico .....	65
Figura 38. Isométrico para conexiones de pruebas.....	71
Figura 39. Conexión de la tubería a la entrada de los colectores parabólicos.....	72
Figura 40. Conexión de T para derivación a la línea de colectores parabólicos .....	72
Figura 41. Conexión de reducciones para derivación a la línea de colectores parabólicos.....	73
Figura 42. Conexión de accesorios al final del cabezal de entrada.....	73
Figura 43. Conexión de válvula de corte a una línea de colectores parabólicos.....	73
Figura 44. Conexión para manguera a la entrada y salida de los colectores parabólicos.....	74
Figura 45. Conexión del ramal a la entrada y salida de los colectores parabólicos .....	74
Figura 46. Cabezal de entrada a los colectores parabólicos .....	74
Figura 47. Cabezal de salida los colectores parabólicos.....	75
Figura 48. Conexión a la entrada de colectores fresnel.....	75
Figura 49. Conexiones a la salida de los colectores fresnel .....	76
Figura 50. Torre de enfriamiento y ventilador .....	76
Figura 51. Conexiones comunes, bomba, tanque para agua y recirculación.....	77
Figura 52. Control para el movimiento de los colectores solares.....	77
Figura 53. Conexiones del medidor de flujo en líneas de colectores parabólicos .....	78
Figura 54. Conexiones del medidor de flujo en línea del colector fresnel .....	78
Figura 55. Flujo máximo en pruebas, $0.0018 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	79
Figura 56. Gradiente de temperatura a $0.0018 \text{ m}^3/\text{s}$ en colectores parabólicos.....	79
Figura 57. Flujo mínimo de pruebas, $0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	80
Figura 58. Gradiente de temperatura a $0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$ en colectores parabólicos.....	80
Figura 59. Deformación de las conexiones de descarga de la segunda línea de los colectores parabólicos .....	81
Figura 60. Flujo medio de prueba, $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	81
Figura 61. Gradiente de temperatura a $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$ en colectores parabólicos.....	82
Figura 62. 2do gradiente de temperatura a $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	82
Figura 63. 3er gradiente de temperatura a $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	83
Figura 64. 4to gradiente de temperatura a $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	83



## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

<i>Figura 65. Flujo mínimo de prueba 0.0002 m<sup>3</sup>/s en colectores Fresnel.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 66. Gradiente de temperatura con flujo de 0.0002 m<sup>3</sup>/s, en colectores fresnel .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 67. Colectores parabólicos en funcionamiento I .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 68. Colectores parabólicos en funcionamiento II.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 69. Colectores fresnel en funcionamiento.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 70. Imágenes de cámara termográfica en concentradores cilindro parabólicos .....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 71. Imágenes de cámara termográfica en concentradores fresnel lineal .....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 72. Eficiencia óptica de los colectores solares .....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 73. Temperatura de salida colectores parabólicos, 24 junio 2015.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 74. Eficiencia térmica colectores parabólicos, 24 junio 2015.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 75. Temperatura de salida colector fresnel lineal, 24 junio 2015 .....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 76. Eficiencia térmica colector fresnel lineal, 24 junio 2015 .....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 77. Temperaturas teóricas de salida, 24 junio 2015.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 78. Temperaturas experimentales de salida, 24 de junio 2015.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 79. Temperaturas de salida teóricas y experimentales, 24 junio 2015.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 80. Eficiencia térmica teórica, 24 junio 2015.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 81. Eficiencia térmica experimental, 24 junio 2015 .....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 82. Eficiencia térmicas teóricas y experimentales, 24 junio 2015.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 83. Eficiencia óptica de los colectores solares, 02 julio 2015.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 84. Temperatura de salida colectores parabólicos, 02 julio 2015.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 85. Eficiencia térmica colectores parabólicos, 02 julio 2015.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 86. Temperatura de salida colector fresnel lineal, 02 julio 2015 .....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 87. Eficiencia térmica colector fresnel lineal, 02 julio 2015.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 88. Temperaturas teóricas de salida, 02 julio 2015.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 89. Temperaturas experimentales de salida, 02 de julio 2015.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 90. Temperaturas de salida teóricas y experimentales, 02 julio 2015.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 91. Eficiencia térmica teórica, 02 julio 2015.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 92. Eficiencia térmica experimental, 02 julio 2015 .....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 93. Eficiencias térmicas teórica y experimental, 02 julio 2015.....</i>	<i>105</i>

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

### Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Parámetros comparativos de discos parabólicos .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 2. Parámetros comparativos de torres de concentración.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3. Parámetros comparativos de concentradores cilindro parabólicos.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4. Parámetros comparativos de colectores fresnel.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 5. Clasificación del recurso geotérmico .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 6. Aplicaciones de la energía geotérmica.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 7. Comparación de parámetros de errores.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 8. Valores de n por meses.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 9. Ángulo horario en grados.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 10. Constantes para un tubo circular.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 11. Comparación eficiencia térmica teórica entre ambos colectores .....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 12. Comparación eficiencia térmica experimental entre ambos colectores.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 13. Comparación eficiencia térmica teórica y experimental entre ambos colectores.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 14. Eficiencias térmicas teóricas, 02 julio 2015.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 15. Eficiencias térmicas experimentales, 02 julio 2015 .....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 16. Eficiencias térmicas teórica y experimental, 02 julio 2015.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 17. Precios de concentradores parabólicos.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 18. Precios de concentradores fresnel lineal.....</i>	<i>108</i>

---

---

## CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

---

---

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el desarrollo tecnológico de las naciones. A su vez, el desarrollo tecnológico determina la utilización de ciertos tipos de energía. Los recursos energéticos son usados por el hombre para satisfacer algunas de sus necesidades básicas en forma de calor y trabajo.

Existen muchas alternativas energéticas renovables. Algunas de ellas no han sido desarrolladas por limitaciones técnicas y económicas, otras se han utilizado sólo parcialmente. Se llama energía renovable a la que, la fuente administrada en forma adecuada, puede explotarse ilimitadamente, es decir, su cantidad disponible (en la Tierra) no disminuye a medida que se aprovecha. La principal fuente de energía renovable es el Sol.

La energía solar, como recurso energético terrestre, está constituida simplemente por la porción de la luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra. Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar. La energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico, se llama fotovoltaica. Se denomina térmica a la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio. En Michoacán el nivel de incidencia de radiación solar es bueno, pero su aprovechamiento prácticamente es nulo para la generación de energía eléctrica por medio de colectores de captación solar.

Por otro lado, la energía geotérmica consiste en extraer calor del magma incandescente de la Tierra, por medio de vapor. Mediante procesos térmicos, es posible generar electricidad, en las plantas llamadas geotermoeléctricas. El magma se encuentra cerca de la superficie terrestre en las zonas con gran actividad volcánica, y es donde es más explotable. En algunos casos el vapor o el agua caliente brotan espontáneamente. En otros, es necesario inyectar agua en pozos y extraerla como vapor. México tiene una gran riqueza geotérmica en algunas regiones. El estado de Michoacán es una región principal del país, tanto en recurso de alta, mediana y baja entalpía, actualmente su explotación ha sido principalmente en el recurso de alta entalpía para generación de energía eléctrica. A pesar de contar con un gran recurso de mediana y baja entalpía su utilización es muy limitada, teniendo como principal aplicación en balnearios de aguas termales.

A pesar de todo el recurso energético disponible, su aplicación directa y aislada se ve limitada por factores como: Tecnología de aprovechamiento disponible de manera comercial, esto es, en el caso de energía geotérmica; en el caso de la tecnología solar, se requieren grandes extensiones de terreno con gran cantidad de sistemas de recuperación de la energía solar, lo que económicamente, inhabilita su aplicación.

En el año 2013 la UMSNH y la empresa Prados Camelinas SA de CV integraron una planta híbrida Geotérmica Solar en la región geotérmica de Araró, Michoacán para la producción de energía eléctrica. Esta planta cuenta con un sistema de aprovechamiento de energía solar por medio de colectores parabólicos con tubos de vacío. Posteriormente se sometió un nuevo proyecto por las instituciones mencionadas para esa misma región, de la misma configuración y capacidad, variando únicamente el tipo de tecnología de captación de energía solar, instalando colectores solares tipo Fresnel lineal en lugar de colectores parabólicos.

## **COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**

El presente trabajo se centra en realizar una comparación de manera técnico – económica de las dos tecnologías posibles de captación solar de foco lineal, colectores parabólicos y fresnel lineal, para el aprovechamiento de sistemas de energía geotérmica de mediana y baja entalpía y determinar mediante esta comparación cual es más viable y redituable.

### **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La degradación medioambiental provocada por el uso prolongado e intensivo de los combustibles fósiles, las grandes implicaciones geopolíticas que representan su control y producción, así como la dependencia excesiva de la economía mundial en los mismos, ha hecho que se mire con nuevos ojos el uso de energías renovables, como la energía geotérmica y especialmente la solar.

El estado de Michoacán cuenta con un buen nivel de irradiación solar, (Figura 12), viable para su aprovechamiento en la producción de energía eléctrica, mediante concentradores solares, pero como en la mayoría del país es casi nula la generación de energía con este tipo de tecnología.

Además, el estado cuenta con zonas geotérmicas con yacimientos de alta, mediana y baja entalpía, sin embargo, la explotación de este recurso solo ha sido enfocada al de alta entalpía. En el estado, la mayor cantidad de recursos geotérmicos se encuentran en reservorios de mediana y baja entalpía (Figura 14), y de estas, solo se tienen pequeñas aplicaciones del recurso, enfocado prácticamente a la balneología.

A pesar de todo el recurso energético disponible, su aplicación directa y aislada se ve limitada por factores como: Tecnología de aprovechamiento disponible de manera comercial, esto es, en el caso de energía geotérmica, los ciclos binario o los ciclos orgánicos; en el caso de la tecnología solar, se requieren grandes extensiones de terreno con gran cantidad de sistemas de recuperación de la energía solar, lo que económicamente, inhabilita su aplicación de manera aislada.

En el año 2013 UMSNH y la empresa Prados Camelinas SA de CV integraron una Planta híbrida Geotérmica solar en la región geotérmica de Araró, esta planta híbrida es la única en su tipo en Latinoamérica que se construyó con fines de generación de energía eléctrica, cuenta con un sistema de aprovechamiento de energía solar por medio de colectores parabólicos con tubos de vacío, sin embargo, con fines de comparar las tecnologías disponibles CPS (Colector Parabólico Solar) y Fresnel lineal para aprovechamiento de este recurso, se sometió un nuevo proyecto de integración de energía solar y energía geotérmica. A pesar de que existen estos proyectos en vías de desarrollo, el presente trabajo se enfocará en evaluar las dos tecnologías desde el aspecto técnico – económico. Definiendo una región geotérmica de estudio con sus condiciones climatológicas, determinando los parámetros de diseño, las variables que afectan el desempeño térmico y considerando varios escenarios de funcionamiento, para determinar cuál de ellas es más factible.

# COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo general

Realizar la comparación técnico-económica de dos tecnologías de concentración solar, concentradores parabólicos solares y fresnel lineal, para su implementación en sistemas de aprovechamiento de energía geotérmica de mediana y baja entalpía.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Definir la región geotérmica en Michoacán, que presente condiciones de mediana y baja entalpía donde pueda aplicarse el presente estudio, así como investigar las condiciones climatológicas de esté.
- Diseño y dimensionamiento del campo solar para el caso de estudio propuesto.
- Determinar las variaciones en un parámetro de desempeño bajo diferentes escenarios de funcionamiento del campo solar.
- Realizar la comparación de funcionamiento del campo solar con las dos tecnologías existentes para este tipo de aplicaciones.
- Determinar en base a los parámetros de desempeño, cuál de las dos tecnologías es más viable, bajo los escenarios propuestos.

## 1.4 JUSTIFICACION

México posee un buen nivel de irradiación solar y cuenta con zonas geotérmicas con yacimientos de mediana y baja entalpía (Michoacán uno de ellos), pero se encuentra limitado para la aplicación aislada de estas tecnologías, en el caso de la energía solar, la limitante principal se debe a la superficie tan grande requerida y por ende los altos costos, y en el caso de la energía geotérmica, a las tecnologías disponibles de manera comercial y las bajas potencias de generación alcanzadas, lo cual lo hace poco atractivo para la principal empresa encargada de la generación de energía eléctrica en el País.

El aprovechamiento en conjunto de la energía solar y energía geotérmica para la producción de electricidad, permitiría el aprovechamiento de los recursos de media y baja entalpía disponibles, utilizando las tecnologías actuales de generación existentes, alejaría al país de forma paulatina y segura de la dependencia de los combustibles fósiles tradicionales (petróleo, carbón, gas, etc.), y mantendría la continuidad de una economía verde y limpia.

Este tipo de proyectos están en vía de desarrollo, en el año 2013 se integró una planta híbrida geotérmica-solar en la región de Araro, Michoacán, entre la UMSNH y la empresa Prados Camelinas S.A. de C.V., utilizando colectores solares parabólicos como concentradores solares, posteriormente se sometió un nuevo proyecto de las mismas características, variando el tipo de tecnología de captación solar, utilizando concentradores fresnel lineal.

Esto permite desarrollar el presente trabajo, enfocado en determinar por medio de un estudio técnico-económico cuál de las dos tecnologías de captación solar posibles a aplicar con el recurso geotérmico es más factible.

## *COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA*

### **1.5 HIPÓTESIS**

La aplicación de fuentes de aprovechamiento de energía termosolar en sistemas de uso de energía geotérmica de mediana y baja entalpía es viable. Sin embargo, mediante un estudio técnico-económico, aplicado a las tecnologías de concentración fresnel lineal y parabólico con tubos de vacío, se puede estimar la tecnología más factible bajo un conjunto de condicionantes técnicas y económicas, para una instalación específica.

### **1.6 METODOLOGÍA**

En forma general, una metodología consiste en conocer el problema, estudiar todas las funciones que se deben cubrir, definir objetivos y establecer un listado de especificaciones o requerimientos técnicos que son la base para la etapa de análisis, obteniendo como resultado un conjunto de ideas o criterios que serán empleados para generar soluciones que satisfagan dichos criterios.

Se debe incluir una etapa de síntesis que dará lugar a la generación de soluciones. El resultado será un diseño que por el momento tendrá un valor provisional. Dado su carácter creativo, los métodos propuestos se centran en el campo de las técnicas de creatividad.

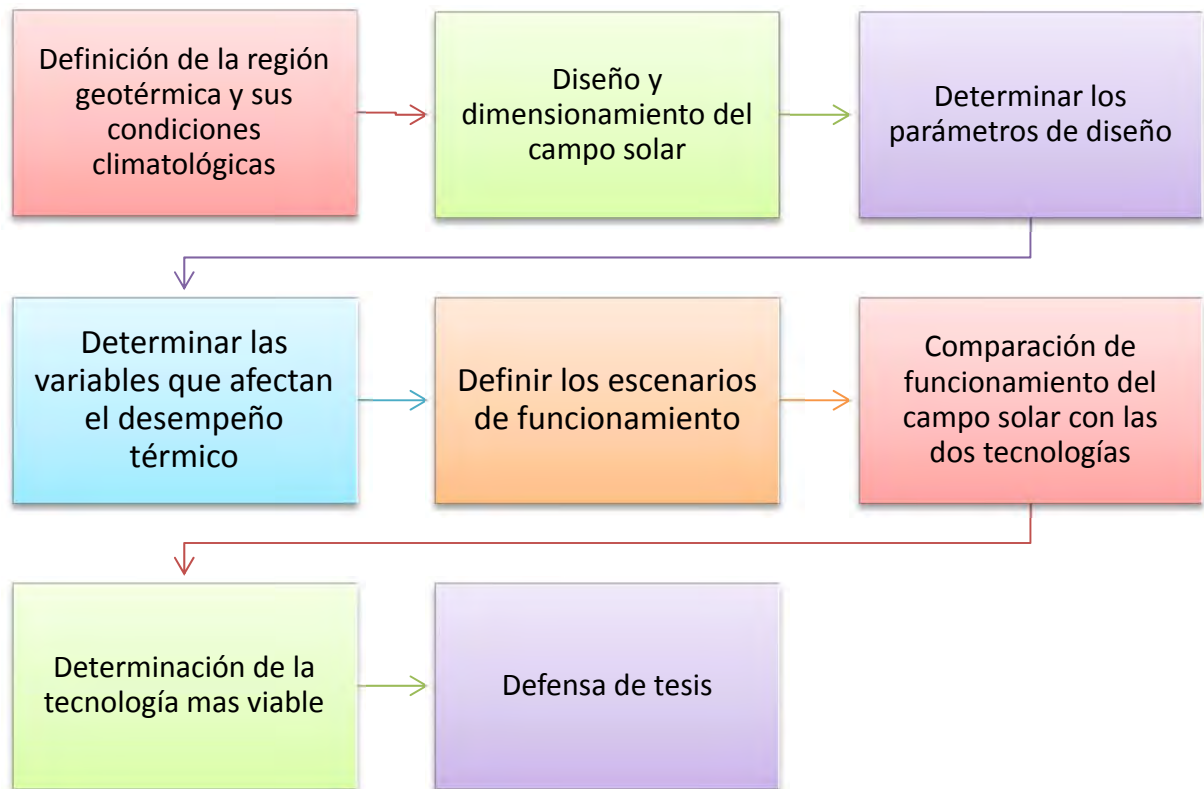
La etapa de simulación es deductiva y en ella se aplicarán los métodos experimentales (modelos térmicos, económicos, etc.) para comprobar el comportamiento del diseño. Teniendo como objetivo conocer, antes de fabricar, si se llega a los que las especificaciones exigen para que la propuesta sea realmente una adecuada solución.

En la etapa de evaluación se realizará una comparación entre las propiedades esperadas con las deseadas, que serán las enunciadas en el listado de especificaciones. Esto dará lugar a una valoración del diseño, que será mejor mientras más se aproxime a las esperadas inicialmente.

En la etapa de decisión se decidirá sobre el resultado del diseño provisional y/o bien se aceptará y refinará o bien se desechará y se buscará una nueva solución.

De acuerdo a las etapas mencionadas de una metodología y tomando los aspectos más importantes, para este desarrollo, se indica de manera gráfica los pasos que se pretenden seguir, para alcanzar los objetivos propuestos del presente proyecto.

*COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA*



---

---

## CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

---

---

### 2.1 ENERGÍA

La energía es la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo: trabajo mecánico, emisión de luz, generación de calor, etc. La energía puede manifestarse de distintas formas: gravitatoria, cinética, química, eléctrica, magnética, nuclear, radiante, etc., existiendo la posibilidad de que se transforme entre sí, pero respetando siempre el principio de conservación de la energía “La energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma”.

Prácticamente toda la energía que disponemos proviene del sol. El sol produce el viento, la evaporación de las aguas superficiales, la formación de nubes, las lluvias, etc. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de los vegetales y de los animales, cuyos restos, con el paso de los siglos, originaron combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural.

Durante casi toda la historia de la humanidad, el hombre ha utilizado las energías renovables como fuente de energía; no es hasta después de la revolución industrial cuando se inicia la utilización generalizada de los combustibles fósiles.

Desde el punto de vista de la utilización de la energía, podemos clasificar la energía en primaria, secundaria y útil.

Energía primaria: es la que se obtiene directamente de la naturaleza y corresponden a un tipo de energía almacenada o disponible, como por ejemplo el petróleo, el carbón, el gas natural, el uranio y las energías renovables.

Energía secundaria: se obtiene a partir de transformaciones de la energía primaria. Ejemplos de esta categoría son la electricidad o la gasolina.

Energía útil: es la que obtiene el consumidor después de la última conversión realizada por sus propios equipos de demanda, como por ejemplo la energía mecánica gastada en un motor, la luminosa en una bombilla, etc. Algunas energías primarias pasan directamente a energía útil, sin transformarse previamente en energía secundaria.

Las fuentes de energía pueden clasificarse, atendiendo a su disponibilidad, en no renovables y renovables.

Las energías no renovables son aquellas que existen en la naturaleza en una cantidad limitada. No se renuevan a corto plazo y por eso se agotan cuando se utilizan. La demanda mundial de energía en la actualidad se satisface fundamentalmente con este tipo de fuentes energéticas: el carbón, el petróleo, el gas y el uranio.

Las energías renovables son aquellas cuyo potencial es inagotable a escala humana, ya que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua, como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la Luna. Son fundamentalmente la energía hidráulica, eólica, biomas, marina, geotérmica y solar [1].



# COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

## 2.2 ENERGÍAS RENOVABLES

El concepto de energía renovable abarca categorías heterogéneas de tecnologías. Algunos tipos de energía renovable permiten suministrar electricidad y energía térmica y mecánica, y producir combustibles capaces de cubrir las múltiples necesidades de los servicios energéticos. Algunas tecnologías de la energía renovable pueden ser adoptadas en el lugar de consumo en medios rurales y urbanos, mientras que otras son implantadas principalmente en redes de suministro de gran tamaño. Aunque es cada vez mayor el número de tecnologías de la energía renovable técnicamente avanzadas en mediana escala, otras se encuentran en una fase menos evolucionada y su presencia comercial es más incipiente, o bien abastecen nichos del mercado especializados. La energía proporcionada por las tecnologías de la energía renovable puede ser: variable y en cierta medida impredecible en diferentes escalas temporales, variable pero predecible, constante o controlable [2].

En la actualidad, la contribución de las energías renovables a nivel mundial ronda el 8%. Existe una creciente conciencia a nivel mundial en lo que se refiere a la problemática energética [1], debido fundamentalmente a:

- La gran dependencia energética del exterior de los países industrializados.
- El agotamiento y encarecimiento de los recursos energéticos fósiles.
- Los recientes descubrimientos sobre el origen antropogénico del cambio climático.

Una implantación generalizada de sistemas de energías renovables tendría repercusiones positivas en muchos ámbitos. Como por ejemplo:

- Se reduciría la dependencia energética externa.
- Se favorecería el desarrollo de la industria local y se generaría empleo.
- Se reducirían los efectos de impacto ambiental, Figura (1).
- Se reducirían las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- El uso de combustibles fósiles sería mucho menor.

**Comparación del impacto ambiental de las diferentes formas de producir electricidad**

(Emisiones de contaminantes para todo el ciclo de combustible. En toneladas por GWh producido)

FUENTE	CO <sub>2</sub>	NOX	SO <sub>2</sub>	PARTÍCULAS SÓLIDAS EN SUSPENSIÓN	CO	HIDRO-CARBURROS	RESIDUOS NUCLEARES	TOTAL
Carbón	1.058,2	2,986	2,971	1,626	0,267	0,102	-	1.066,1
Gas natural (**)	824,0	0,251	0,336	1,176	TR(*)	TR	-	825,8
Nuclear	8,6	0,034	0,029	0,003	0,018	0,001	3,641	12,3
Fotovoltaica	5,9	0,008	0,023	0,017	0,003	0,002	-	5,9
Biomasa	0,0	0,614	0,154	0,512	11,361	0,768	-	13,4
Geotérmica	56,8	TR	TR	TR	TR	TR	-	56,8
Eólica	7,4	TR	TR	TR	TR	TR	-	7,4
Solar térmica	3,6	TR	TR	TR	TR	TR	-	3,6
Hidráulica	6,6	TR	TR	TR	TR	TR	-	6,6

(\*) Trazas. (\*\*) Gas natural en ciclo combinado  
La emisión de la biomasa presupone la regeneración anual de la cantidad consumida, lo que raras veces sucede.

Fuente: US Department of Energy, Council for Renewable Energy Education y Worldwatch Institute.

Figura 1. Impacto ambiental de formas de producir electricidad

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Hay muchas formas de energía renovable. La mayor parte de estas energías dependen de un modo u otro de la luz del sol. El viento y la energía hidroeléctrica son el resultado directo del calentamiento diferencial de la superficie de la tierra que lleva al aire moviéndose (viento) y la precipitación que forman cuando el aire se levanta. La energía de la biomasa almacena la luz solar contenida en las plantas. La energía de las mareas, una conversión de la energía gravitacional. La energía geotérmica, que es un resultado de la desintegración radiactiva en la corteza combinado con el calor original de acreción de la Tierra. La energía solar es obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del sol.

A continuación, se hace una descripción de algunas de las energías renovables, destacando sus aspectos más importantes.

### 2.2.1 Energía Hidráulica

El agua es un elemento básico para la vida y un recurso que, a lo largo de la historia, ha determinado el desarrollo humano. Necesitamos agua para beber, agua para la agricultura que nos proporciona alimentos, y agua para la práctica totalidad de los procesos productivos. También para la obtención de energía. Los molinos de agua romanos, o las norias de la cultura musulmana son ejemplos del aprovechamiento de la fuerza del agua desde tiempo inmemorial, para sustituir el trabajo humano o animal. Pero será con la invención generalizada a finales del siglo XIX cuando el agua se contempla como una fuente básica para la producción de energía eléctrica por lo que adquiere un mayor valor en el ambiente energético. De hecho, las centrales hidráulicas son el origen de la industria eléctrica mundial, que comenzó a producir vatios gracias a la fuerza del agua [3].

La energía hidráulica se utiliza fundamentalmente para producir electricidad en las denominadas centrales hidroeléctricas. El agua, retenida en un embalse o presa, se deja caer por una tubería, a cuya salida se coloca una turbina, el eje de la cual comienza a girar al caer el agua; este giro pone en marcha el generador eléctrico obteniéndose así la electricidad, ver Figura (2).

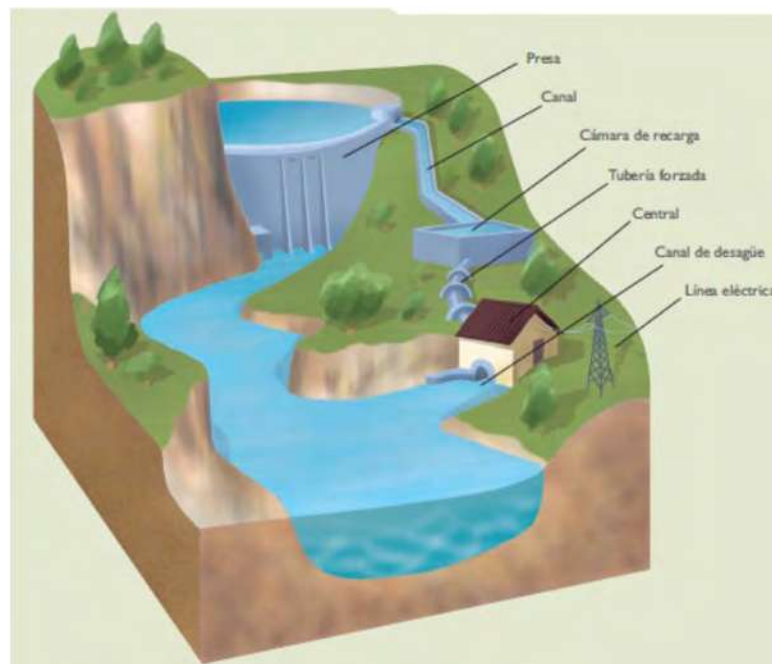


Figura 2. Esquema de una central hidráulica

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Las centrales hidroeléctricas se clasifican según su potencia, en:

- Centrales mini hidráulicas: centrales con una potencia instalada menor de 10 MW. Comenzaron a construirse a principios del siglo XX y solían ser instalaciones modestas que generaban electricidad a pequeñas poblaciones. En su mayoría son instalaciones de agua fluyente, lo que quiere decir que generaban electricidad mientras tienen un caudal superior a un mínimo técnico y se paran cuando el caudal baja ese nivel.
- Centrales hidráulicas: centrales mayores de 10 MW. Debido a la generación de un gran impacto ambiental y humano, no es considerada estrictamente como una energía renovable, aunque tiene la gran ventaja de no contribuir al cambio climático, al no emitir CO<sub>2</sub> ni otros gases de efecto invernadero.

La tecnología más usada en la actualidad para aprovechar la energía del movimiento del agua es la turbina hidráulica. Existen distintos tipos de turbinas; Turbinas Pelton, para grandes saltos, independientemente de la variación de caudal. Turbinas Francis, para saltos medios-bajos y variaciones de caudal moderadas. Turbinas Kaplan, para saltos pequeños y caudales variables. Además de las turbinas, existen otras tecnologías como las ruedas hidráulicas y las bombas de ariete, utilizadas para aplicaciones de pequeña escala tales como el bombeo de agua.

Entre las ventajas que ofrece tanto el uso de la energía hidráulica como de las instalaciones que la acompañan, podemos indicar las siguientes:

- El proceso de transformación es limpio, no se producen residuos que pudieran contaminar la atmósfera.
- Las presas que se construyen para embalsar el agua permiten regular el caudal del río, evitando inundaciones en épocas de lluvia y haciendo posible el riego de tierras de cultivo.
- El agua almacenada puede servir para el abastecimiento a ciudades.
- Los embalses suelen ser utilizados como zonas de esparcimiento, para practicar gran cantidad de deportes acuáticos.

La utilización a gran escala también presenta algunos inconvenientes, entre los que destacan:

- Las almacenamientos de agua anegan extensas zonas de terreno, por lo regular de gran valor ecológico, en los valles de los ríos. En algunas ocasiones, han inundado pequeñas poblaciones.
- Alteración del equilibrio ambiental, en perjuicio de los seres vivos existentes en la zona.
- Al interrumpir el curso natural del río, se producen graves alteraciones en la flora y en la fauna fluvial.
- Gran dependencia respecto a las precipitaciones.

Las centrales hidroeléctricas tienen costos relativamente bajos y compiten favorablemente con las tecnologías de energías no renovables. Aunque los costos de inversión varían mucho de un sitio a otro, un valor promedio es US\$2,100/KW, mientras que el costo de la electricidad generada es típicamente de entre 3 y 4 US¢/KWh [4].

Existe en el Mundo una capacidad hidroeléctrica instalada de 860 GW. En México la capacidad hidroeléctrica instalada es de 11.4 GW, de los cuales aproximadamente 300 MW corresponden a pequeñas centrales de las empresas públicas, y 90 MW a centrales privadas de autoabastecimiento. La generación es de 27,300 GWh/año. La Prospectiva del Sector Eléctrico contempla la construcción de

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

nuevas centrales hidroeléctricas con una capacidad de 1,224 MW en el transcurso de los próximos 10 años.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha identificado el potencial hidroeléctrico del país en aquellos sitios con una potencia media mayor de 5 MW. Excluyendo las centrales en operación y en planeación, el potencial identificado es de 39 GW. Este potencial es meramente indicativo, pues falta definir la factibilidad técnica, económica, ambiental y social para muchos de estos proyectos. Se puede suponer sin embargo que por lo menos el 25% de este potencial sea factible [4].

Existe además un potencial importante en centrales de menor tamaño, pero, con la excepción de un estudio realizado en una región de los estados de Puebla y Veracruz, este potencial no se ha evaluado. De manera muy preliminar se ha estimado que el potencial nacional para pequeñas hidroeléctricas es de alrededor de 3 GW. Al igual que para el caso de la energía eólica, en la medida en que se reconozcan los distintos beneficios de las pequeñas centrales hidroeléctricas, incluyendo su impacto en la mitigación del cambio climático, este potencial será económica y financieramente factible. Existe también un potencial no identificado para la construcción de micro-centrales hidroeléctricas para abastecer de electricidad a comunidades aisladas de la red eléctrica, así como para satisfacer otros servicios energéticos como el bombeo de agua por bombas de ariete [4].

### 2.2.2 Energía Eólica

Apenas un 2% de la energía solar que llega a la Tierra se convierte en energía eólica y sólo podemos aprovechar una pequeña parte de ella. Aun así, se ha calculado que el potencial eólico es unas veinte veces el actual consumo mundial de energía, lo que hace de la energía eólica una de las fuentes de energía renovable más importantes.

El viento es, fundamentalmente, una consecuencia de la radiación solar que incide sobre la Tierra, y que origina el calentamiento de las masas de aire que la circundan. Al calentar de forma desigual la superficie del planeta en función de la latitud, se provocan unas diferencias de presión que el flujo de aire tiende a igualar.

El viento se define mediante la dirección y la velocidad. La dirección del viento se designa por el punto cardinal desde donde sopla: por ejemplo, se llamará viento de dirección Oeste o viento del Oeste si proviene de este punto. Esta dirección nos la da la veleta. La velocidad es la que da al viento su energía. Se mide con anemómetros, siendo los más utilizados en prácticamente todas las estaciones meteorológicas los anemómetros de rotación de cazoletas. Las condiciones de viento en un territorio vienen determinadas por tres tipos de circulación de aire, según los efectos dominantes: circulación a escala planetaria o macroescala, a escala local o mesoescala y a escala próxima al emplazamiento o microescala [5].

Las turbinas eólicas transforman la energía cinética del viento en energía mecánica, ya sea para mover directamente una máquina tal como una bomba de agua, o bien para impulsar un generador eléctrico. Existen turbinas de muchos tamaños, desde unos 500 W, hasta más de 7 MW. Las de mayor tamaño están destinadas principalmente a granjas eólicas marinas. En el transcurso de las últimas dos décadas la tecnología de las turbinas eólicas ha avanzado radicalmente y sus costos se han reducido hasta hacerse competitivos con las tecnologías convencionales en contextos geográficos favorables [4].

La energía eólica ha alcanzado tal nivel de desarrollo, que permite afirmar que nos encontramos ante una fuente energética limpia, económicamente competitiva y con una tecnología de aprovechamiento madura. Partiendo de una fuente natural, renovable y no contaminante, los actuales aerogeneradores son capaces de producir electricidad a precios competitivos frente a las fuentes tradicionales

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

energéticas, lo que ha permitido en los últimos años posicionar a la energía eólica como la fuente energética de crecimiento mundial más rápido.

El mercado de la energía eólica se está desarrollando con tasas anuales de crecimiento en torno al 30%, habiendo pasado de los 2.500 MW en el año 1992, a 94.000 MW al 1 de enero de 2008, con lo que se proporciona energía suficiente para satisfacer las necesidades de unos 50 millones de hogares, más de 120 millones de personas.

El costo de las turbinas eólicas es de aproximadamente US\$1,700 por kW. El costo de la electricidad generada depende de la velocidad del viento y de su distribución a lo largo del año. En condiciones óptimas, con costos de alrededor de 5 centavos de dólar por kWh, esta tecnología resulta competitiva con muchas de las tecnologías convencionales de generación de electricidad.

La energía eólica se ha desarrollado a pasos acelerados en el Mundo durante los últimos años. En el año 2008, la capacidad instalada mundial llegó a los 120,800 MW. En México existen en la actualidad 170 MW de capacidad eólica en operación, que se dividen en:

- 85 MW en los proyectos La Venta I y La Venta II (Figura 3) operados por la CFE en el Istmo de Tehuantepec.
- 80 MW en el proyecto de autoabastecimiento Parques Ecológicos de México, que entró gradualmente en operación desde enero del 2009.
- 0.6 MW en una turbina de la CFE en Guerrero Negro, Baja California Sur.
- 2 MW en pequeños aerogeneradores en sitios aislados de la red.
- 3 MW en pequeñas aerobombas (turbinas eólicas que impulsan bombas hidráulicas).



**Figura 3. Central eoloelectrónica de la Venta II**

La CFE licitó recientemente otros dos proyectos denominados La Venta III y Oaxaca I, cada uno con una capacidad de 101.5 MW. Estos proyectos se realizarán en la modalidad de producción independiente de Energía. Otros tres proyectos de CFE en la misma modalidad con una capacidad total de 304 MW están planeados para entrar en operación en el transcurso de los próximos años.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Por otro lado, están en proceso de construcción o de planeación un gran número de proyectos eólicos de autoabastecimiento y de exportación, ubicados principalmente en el Istmo de Tehuantepec, así como en La Rumorosa, en Baja California, Nuevo León y Tamaulipas. Estos proyectos, con una capacidad total de más de 2,000 MW, se han hecho posibles gracias a instrumentos regulatorios favorables.

El potencial eólico del país no ha sido evaluado de manera exhaustiva. Se han realizado, sin embargo, evaluaciones del recurso en regiones específicas. En particular el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos ha coordinado la realización de mapas eólicos para Baja California Sur, las costas de Yucatán y de Quintana Roo y las franjas fronterizas de los estados de Baja California, Sonora y Chihuahua. Estos mapas se han realizado conjuntando información de estaciones meteorológicas con técnicas de prospección remota.

La Asociación Mexicana de Energía Eólica estima que el potencial de capacidad es de 10,000 MW. Por otro lado, los estudios del Instituto de Investigaciones Eléctricas establecen un potencial competitivo en 5,000 MW y un potencial probable en 15,000 MW. La perspectiva de desarrollo que maneja la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es de 7,000 MW. En el siguiente mapa se muestra la localización y el avance de los proyectos eólicos [6].



Figura 4. Distribución del recurso potencial eólico

Las posibilidades de desarrollo de la energía eólica en el corto y en el mediano plazo en México dependen no solo del potencial físico del recurso, sino también de la capacidad industrial y de la capacidad del sistema eléctrico para absorber la electricidad generada sin poner en riesgo la seguridad y la estabilidad del sistema. La factibilidad económica de estos proyectos dependerá de los mecanismos regulatorios y del acceso a los instrumentos internacionales relacionados con la mitigación del cambio climático.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

### 2.2.3 Biomasa

Biomasa –también conocida como bioenergía o biocombustibles– es la fracción biodegradable de los productos y residuos de la agricultura, la forestación y sus industrias asociadas. El término también incluye la fracción orgánica de los desperdicios municipales e industriales. Dicha biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede, en última instancia, de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta materia orgánica es renovable cuando se produce a la misma velocidad de consumo, evitando la sobreexplotación de los recursos naturales [7].

La forma de transformar la biomasa en energía depende, fundamentalmente, del tipo de biomasa que se esté tratando y del destino que se quiera dar a esta energía. El sector bioenergético está basado en tres modos de usar la energía: para calefacción, para generación eléctrica y para producción de biocombustibles.

La bioenergía en sus distintas formas se puede aprovechar en aplicaciones térmicas, para la generación de electricidad o para la producción de biocombustibles líquidos para transporte. Por lo que se refiere a las aplicaciones térmicas, las tecnologías más usadas en México son los fogones tradicionales de leña, utilizados para cocción y para calefacción en viviendas rurales y de pequeñas ciudades. Asimismo, la leña se utiliza en microempresas y en pequeñas industrias para la producción de cerámica, ladrillos, pan y otros productos. En las últimas décadas se han desarrollado distintos modelos de estufas y hornos de leña mejorados con el fin de reducir los impactos en la salud que provoca el humo de los fogones tradicionales, así como reducir el consumo de leña.

La biomasa se utiliza además en varias aplicaciones industriales: la energía contenida en productos de biomasa o derivados de la biomasa tales como el bagazo de caña, el licor negro, el biogás y distintos residuos agrícolas y agroindustriales son utilizados en industrias por medio de calderas y otras tecnologías para la producción de calor y, en algunos casos, electricidad.

La Figura 5, nos muestra un esquema referente a una central de biomasa.

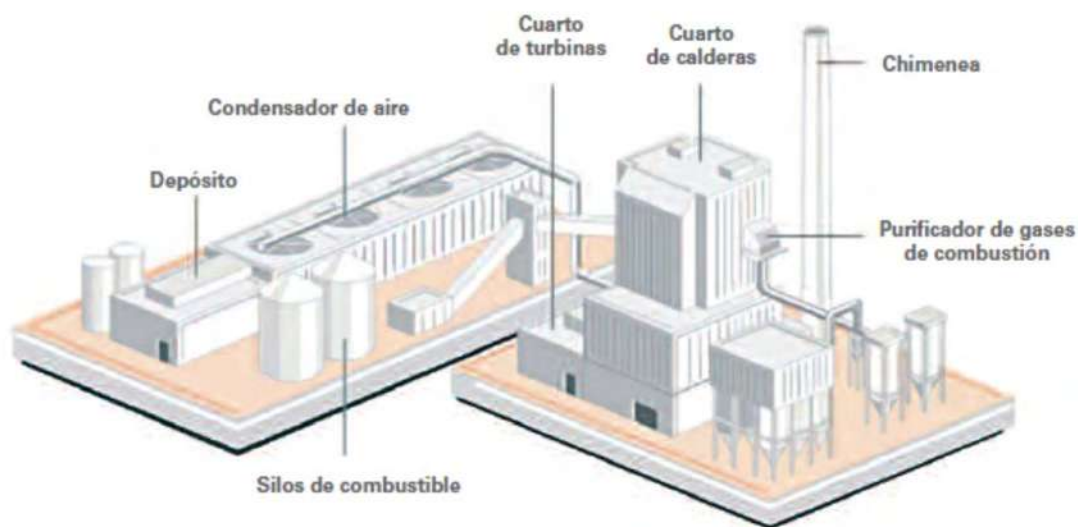


Figura 5. Esquema de una central de biomasa

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Las tecnologías para la generación de electricidad y/o calor a escala industrial a partir de la biomasa tienen un costo aproximado de US\$1,500/kW. Los costos correspondientes de la energía son de entre 5 y 12 US ¢ /kWh para la electricidad, y de entre 1 y 5 US ¢ /kWh para el calor.

Finalmente, las plantas de producción de bioetanol y de biodiesel requieren respectivamente de inversiones de US\$390 y \$330 por cada m<sup>3</sup> al año de capacidad. Los costos de producción varían mucho de acuerdo con las circunstancias locales, pero las referencias internacionales sugieren valores de entre 25 y 30 US ¢ /litro para el bioetanol, y de entre 40 y 80 US ¢ /litro para el biodiesel.

Las tecnologías tradicionales de biomasa, por su parte, satisfacen el 6% de la demanda primaria de energía en el Mundo. En México, el uso tradicional de la leña aporta el 3% de oferta interna y el 28% de la energía consumida por el sector residencial en México. Se estima que este combustible es usado por alrededor de una cuarta parte de la población, por medio de fogones tradicionales.

El potencial de la bioenergía en México va mucho más allá del limitado aprovechamiento que se hace de ella en la actualidad. Se calcula que el potencial total es de entre 3,000 y 4,500 PJ/año. Este potencial se divide en combustibles de madera (provenientes de bosques naturales o de plantaciones, o subproductos de la extracción forestal y la industria maderera), agrocombustibles y biogás de rellenos sanitarios. A partir de este potencial, sería posible, de manera sustentable:

- Satisfacer las necesidades de energía para cocción y calefacción de la población que actualmente usa leña, por medio de estufas mejoradas.
- Producir carbón vegetal para usos domésticos, pequeños comercios y también para sustituir el uso de coque en la industria siderúrgica.
- Generar aproximadamente 50,000 GWh de electricidad al año a partir de madera en pequeñas centrales eléctricas (20% de la demanda nacional de electricidad).
- Producir bioetanol y biodiesel para satisfacer hasta el 10% de la demanda de gasolina y 5% de la demanda de diésel, respectivamente.

Con la excepción de la producción de biocombustibles, todas estas opciones son actualmente económicamente factibles, en la medida en que se valoren sus ventajas, en cuanto a reducción de impactos en salud por el uso de fogones tradicionales, y reducción de la deforestación por el manejo forestal sustentable.

### 2.2.4 Energía Marina

La superficie del planeta Tierra está cubierta en cerca de un 80%, por agua, donde la mayor parte de ésta corresponde a océanos. El mar posee una serie de características que lo transforman en una alternativa de utilización como fuente de energía, dentro de las cuales se encuentran principalmente: el movimiento de las olas, la oscilación de las mareas, el flujo de corrientes marinas, los flujos de los estuarios y las variaciones de salinidad y temperatura [8].

Uno de sus componentes más singulares son las mareas, que están causadas por el juego de atracciones gravitacionales entre la tierra, la luna y el sol, mientras que las olas se originan por la fuerza del viento. Se pueden extraer del mar dos tipos de energía: la energía térmica proveniente del sol y la energía mecánica producida por mareas, olas y corrientes. Cada uno de ellos cuenta con desarrollos tecnológicos para su aprovechamiento en diferentes grados de madurez [9].

*Energía térmica oceánica:* se puede generar electricidad gracias a la diferencia de temperatura existente entre la superficie y el fondo, siendo la diferencia óptima de 20°C. Respecto a la intermitencia del procedimiento mecánico el térmico tiene la ventaja de constituir una fuente constante de energía.



## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

*Energía mecánica:* la fuerza y el movimiento de las mareas, las olas y las corrientes se emplean para activar finalmente un generador mediante el empleo de diversos mecanismos dependiendo de la fuente y el sistema utilizado.

En general, la energía marina tiene la ventaja de emplear una fuente de combustión limpia y renovable dado que su uso no contamina el aire y es inagotable. Además, suele estar disponible según lo requiera la necesidad del momento porque gracias a las turbinas es posible producir la electricidad respondiendo a la demanda. Por el contrario, puede existir un impacto medioambiental negativo debido a la restricción de las corrientes o a la reducción en los niveles de oxígeno del agua por lo que es necesario estudiar en profundidad el entorno local y la vida marina analizando las consecuencias de la implantación de una instalación de este tipo. Aun así, la escasa sensibilización social respecto a la energía marina es la que se considera una de las mayores trabas para el desarrollo de este tipo de aprovechamiento energético [9].

En México se tiene muy poco aprovechamiento de esta energía, debido principalmente a problemas como, el del oleaje que es medio-bajo, así como la tecnología en desarrollo no es la adecuada para las características del oleaje prevaleciente en el litoral mexicano. En la Figura 6, se muestra mapa del oleaje en el pacífico, donde se puede apreciar un bajo potencial para la zona del pacífico mexicano.

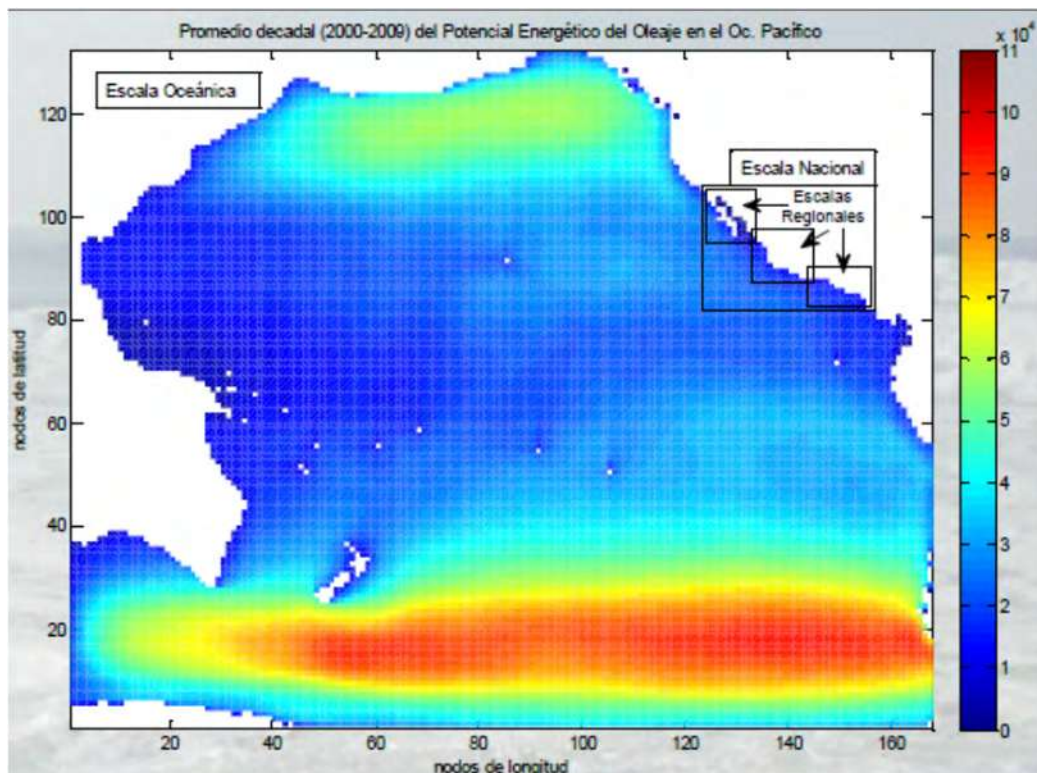


Figura 6. Potencial energético del oleaje en el océano pacífico

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

### 2.2.5 Energía Solar

Para los fines del aprovechamiento de su energía, el Sol es una inmensa esfera de gases a alta temperatura, con un diámetro de  $1.39 \times 10^9$  m, situado a la distancia media de  $1.5 \times 10^{11}$  m respecto de la Tierra. Esta distancia se llama unidad astronómica [10].

Se estima que la temperatura en el interior del Sol debe ser del orden de  $10^7$  K, pero en la fotosfera, es decir, en la superficie externa del Sol, la temperatura “efectiva del cuerpo negro” es de 5762 K. Existen, sin embargo, otras formas de calcular la temperatura de la fotosfera, que dan como resultado alrededor de 6300 K. Es claro que nadie ha colocado un termómetro en la superficie del Sol. Su temperatura se mide por métodos indirectos, basados en diversos modelos. De ahí que no coincidan todas las estimaciones de su temperatura.

El Sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión, por ejemplo dos átomos de hidrógeno que producen helio, o uno de helio y uno de hidrógeno que producen litio, etc., que se lleva a cabo en su núcleo. La generación de energía proviene, por tanto, de la pérdida de masa del Sol, que se convierte en energía de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein,  $E= mc^2$ , donde E es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa m; c es la velocidad de la luz.

El núcleo solar es la región comprendida dentro del 23 % de su radio, a partir del centro, que corresponde a tan solo el 15% del volumen, pero en cambio contiene el 40% de la masa y ahí se genera el 90% de la energía. En esa región, la temperatura es del orden de  $10^7$  K y la densidad es del orden de  $10^5$  Kg/m<sup>3</sup>. A una distancia del 70% del radio solar, la temperatura es del orden de  $10^5$  K y la densidad es de unos 70 Kg/m<sup>3</sup>. La zona que va del 70% al 100% del radio solar, se conoce como zona convectiva y su temperatura se eleva de 5000 a 6000 K, mientras la densidad desciende a  $10^5$  Kg/m<sup>3</sup>. La capa externa de esta región recibe el nombre de fotosfera y es considerada como la superficie del Sol, por ser esta región opaca, de donde se emite la gran mayoría de la radiación solar hacia el espacio.

Se define energía solar a aquella que mediante conversión a calor o electricidad se aprovecha de la radiación proveniente del sol; otra forma de aprovechamiento asociado considera la posibilidad de hacer uso de la iluminación natural y las condiciones climatológicas de cada emplazamiento en la construcción de edificios mediante lo que se denomina arquitectura bioclimática.

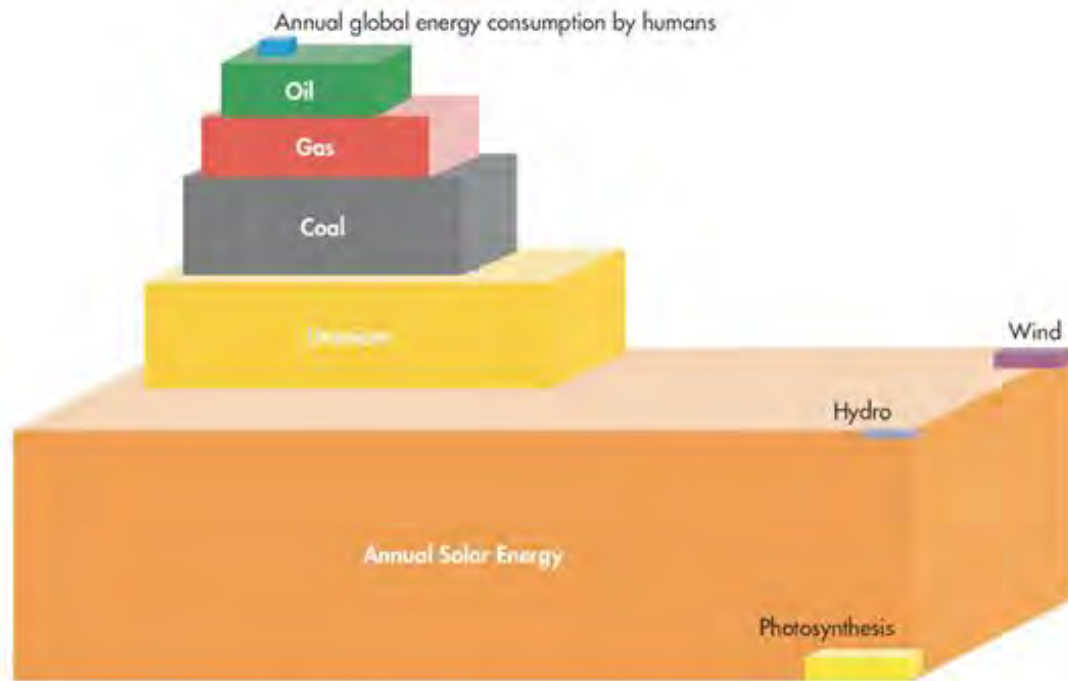
#### 2.2.5.1 La energía solar como fuente de energía mundial

La radiación electromagnética procedente del Sol es la fuente de energía más abundante y limpia de que se dispone en nuestro planeta.

Se estima que la energía total que absorbe la atmósfera, los océanos y los continentes es de unos 3, 850,000 exajulios por año. Suficiente energía solar recibida anual es tan vasta que equivale aproximadamente al doble de toda la energía producida jamás por otras fuentes de energía no renovable como son el petróleo, el carbón, el uranio y el gas natural.

En la Figura 7, se muestra de manera gráfica la comparación entre la energía solar anual y otras fuentes de energía más comunes, que son consumidas por el hombre de manera global.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA



Source: National Petroleum Council, 2007 after Craig, Cunningham and Saigo.

**Figura 7. Energía global anual consumida por humanos**

Otra de las grandes ventajas de la energía solar es que, si bien es más abundante en latitudes próximas al ecuador, su distribución planetaria es mucho más uniforme que la de las fuentes de energía fósiles. Una economía mundial sustentada en esta energía y no en el petróleo presentaría fluctuaciones de precio mucho menor y una mayor seguridad de abastecimiento, eliminando muchas tensiones políticas entre países productores y consumidores y, aportando así una previsible estabilidad a la situación mundial.

Sin embargo, su dispersión y discontinuidad dificultan notablemente el aprovechamiento de esa fuente de energía, lo que la sitúa en desventaja en relación a otros tipos de fuentes energéticas.

### 2.2.5.2 Radiación que llega a la tierra

Aproximadamente el 30% de la radiación procedente del Sol es reflejada de vuelta al espacio mientras que el resto es absorbida por las nubes, los océanos y las masas terrestres.

Antes de alcanzar cualquier punto de la superficie de la Tierra, la radiación solar ha de atravesar la atmósfera terrestre, en la que se ve sometida a un proceso de atenuación. La principal causa de esta atenuación son las nubes, que reflejan la radiación de vuelta hacia el exterior. La radiación que no es reflejada por las nubes, se verá reducida durante el camino recorrido en el interior de la atmósfera hasta la superficie terrestre. La altura y posición del Sol determinarán la longitud de este recorrido, durante el cual tiene también una notable influencia la difusión atmosférica provocada por el vapor de agua, partículas de polvo, y gases como el dióxido de carbono o el ozono. La intensidad de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra se reduce también por la inclinación del plano que recibe la radiación respecto de la posición normal de la radiación.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

De forma general, se puede decir que la radiación incidente sobre la superficie terrestre tiene dos componentes: la radiación directa, que no ha sufrido modificación en su dirección desde el Sol, y la radiación difusa, procedente de todas las direcciones de la semiesfera celeste por encima del plano horizontal así como de la reflexión de la radiación reflejada por el suelo.

### 2.2.5.3 Formas de aprovechamiento de la energía solar

Entre los posibles usos que pueden hacerse de la energía solar destacan los siguientes:

- Calefacción domestica: mediante energía solar térmica se consigue el agua caliente necesaria para alimentar un sistema de calefacción.
- Calentamiento de agua: obtención de agua caliente sanitaria mediante energía solar de baja temperatura.
- Destilación: la purificación de fluidos, específicamente la desalación o destilación de agua, utilizando como fuente energética la radiación solar es una técnica ya desarrollada con grandes ventajas económicas, sobre todo por el ahorro de electricidad o petróleo, así como la calidad del agua obtenida. Las experiencias acumuladas son contundentes en demostrar que la destilación solar del agua de mar salobre es una opción tecnológica y económicamente factible.
- Fotosíntesis: los paneles fotovoltaicos tienen un costo elevado por utilizar como material principal el silicio. Por este motivo surgen unos paneles solares que actúan como foto sintetizadores, los cuales contienen un tinte sensibilizado que realiza la fotosíntesis como las plantas.
- Evaporación: la evaporación flash por energía solar puede realizarse de dos formas, directamente mediante colectores solares o a partir de energía solar termodinámica, es decir, en un circuito cerrado en el que se comprime un refrigerante alcanzando altas temperaturas.
- Generación de energía eléctrica: Calentamiento de agua mediante energía solar de media o alta temperatura, para producir vapor bien directamente o bien mediante un intercambiador. El vapor es introducido en una turbina de vapor para generar energía eléctrica.

### 2.2.5.4 Sistemas termosolares de concentración

Los sistemas solares de concentración se caracterizan por el uso de dispositivos que redireccionan la radiación solar incidente sobre una determinada superficie (superficie de captación) y la concentran sobre una superficie de menor tamaño (superficie absorbadora o absorbedor) [11].

Los sistemas termosolares de concentración permiten alcanzar mayores temperaturas en el fluido de trabajo que los sistemas termosolares de baja temperatura. Sin embargo, las pérdidas por radiación en el receptor son proporcionales a la cuarta potencia de la diferencia de temperatura entre este y los alrededores, por lo que su rendimiento disminuirá con dicha diferencia. Estas pérdidas son, además, de proporcionales al área de la superficie absorbadora, que puede reducirse si se aumenta la relación de concentración. Una característica diferencial de estos es que la concentración de la radiación se realiza mediante reflexiones especulares, y esto hace que únicamente sea aprovechable la componente directa de la radiación solar. Los sistemas termosolares de concentración son, de forma general, sistemas de aprovechamiento de la energía solar en media y alta temperatura.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Existen diversos tipos de sistemas termosolares de concentración [12], según la forma que concentran la radiación solar:

- Foco puntual: en este caso la radiación es reflejada desde los espejos hacia un punto concreto. Esto hace necesario un seguimiento solar en dos ejes, lo que encarece los costos pero también reduce las pérdidas debidas a un enfoque deficiente. Una de las principales ventajas de los receptores puntuales son las altas temperaturas que se alcanzan, que favorecen rendimientos más altos. Existen dos tipos de concentradores de foco puntual:

1. Campos de heliostatos con sistemas de torre central
2. Discos parabólicos

- Foco lineal: estos sistemas concentran la energía solar, mediante espejos que reflejan y enfocan la radiación solar sobre un tubo absorbedor. Por el interior del tubo circula un fluido caloportador que es calentado. Este calor puede ser producido después, por ejemplo, para producir vapor de agua sobrecalentado y expandirlo en una turbina, o para accionar una máquina de absorción.

Los campos de colectores lineales suelen constar de un gran número de espejos colocados en filas paralelas, normalmente alineadas en dirección norte-sur para maximizar la producción anual. Estas filas de espejos disponen de un sistema de seguimiento solar en un único eje que les permite girar para asegurar la radiación es continuamente reflejada sobre el tubo absorbedor. Existen dos tipos de concentradores lineales:

1. Concentradores cilindro parabólicos (CSP)
2. Concentradores tipo Fresnel

### 2.2.5.5 Concentradores de Discos Parabólicos

Los discos parabólicos concentran los rayos solares a un punto focal ubicado sobre el centro del disco. El aparato sigue al sol, con el disco y el receptor moviéndose en conjunto, ofreciendo la mayor eficiencia en sistemas de baja capacidad de generación (Figura 8).



Figura 8. Concentradores de discos parabólicos

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Para el disco concentrador, hay esencialmente 3 tipos diferentes de construcción: puede ser con una superficie continua del espejo, compuesta de muchos espacios cerrados con la superficie de los espejos ligeramente curvados, o hechos con una pequeña separación en los concentradores teniendo un punto focal en común.

La área de la superficie de los espejos son típicamente en el rango de 50- 100 m<sup>2</sup>. En la radiación del absorbedor, la cual está en el punto focal de los espejos, unido de manera rígida al concentrador, temperaturas de hasta 800 °C son producidas [13].

El calor es absorbido por un motor termodinámico, mediante un ciclo Stirling, de alta eficiencia con Hidrógeno o Helio y que cuenta con un sistema de enfriamiento, que se usa un fluido que trabaja en ciclo cerrado. Este diseño elimina la necesidad de un fluido de transferencia y de agua de enfriamiento.

Los discos ofrecen el mejor desempeño de conversión solar a electricidad de cualquier sistema de concentración solar. Una serie de características, como su tamaño compacto, ausencia de agua de enfriamiento, entre otras, los ponen en competencia con módulos fotovoltaicos, así como también con otras tecnologías de concentración solar. La producción en masa permite ser una tecnología competitiva con sistemas de mayor capacidad, con el beneficio de las economías de escala.

En el inicio de la fase reciente del desarrollo de la tecnología del disco, que es, en los principios de 1980, había en paralelo el desarrollo de plantas de disco Stirling, también proyectos para centrales de generación eléctrica, 1 en Kuwait y 2 en USA. El más largo de estos proyectos fue una planta de 5 MW en California con 700 discos concentradores. Esto fue conceptual y tecnológicamente sistemas no maduros, sin embargo, no se establecieron satisfactoriamente [13].

En la tabla 1, se indican los parámetros comparativos dentro de la familia, con valores correspondientes a referencias internacionales.

**Tabla 1. Parámetros comparativos de discos parabólicos**

Potencia	10 – 25	kW
Factor de planta	50 – 60	%
Eficiencia de conversión	25 – 30	%
Costos de inversión	10, 000	USD/kWp
Costos de operación y mantenimiento	48.2	USD/kW/año
Costo medio de la energía	28.3	centavos USD/kWh

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

### 2.2.5.6 Concentradores con torre de Concentración

Para plantas de larga escala en particular en el rango de cientos de Mega Watts, esto es probablemente más económico razonable en los términos de longitud focal de la radiación solar dentro de un punto fijo por el uso de campo movible de un área larga, cerca de los espejos planos. En esta central, el punto absorbedor es montado sobre una torre y en ella, temperaturas altas son obtenidas de 600-1200 °C, dependiendo del medio de enfriamiento y del tipo de receptor [13].

Las torres solares, o sistemas de recepción central, utilizan cientos de reflectores pequeños para concentrar los rayos solares en un receptor central ubicado en lo alto de una torre fija (Figura 9).



**Figura 9. Concentradores con torre de concentración**

Algunas plantas de torre comerciales en operación, utilizan generación directa de vapor en sus receptores, mientras que otras utilizan sales fundidas, como el fluido de transferencia de calor y el medio de almacenamiento [14].

El sistema se compone de los espejos, la torre de concentración, el sistema de conversión de energía térmica en eléctrica, el de enfriamiento y el fluido de trabajo. El poder de concentración del concepto de torre alcanza temperaturas sumamente altas, aumentando la eficiencia a la cual el calor es convertido en electricidad y reduciendo los costos de almacenamiento térmico. Además, el diseño es altamente flexible, permitiendo a diseñadores escoger de una gran variedad de heliostatos, receptores, fluidos de transferencia y bloques de poder.

En la tabla 2, se indican los parámetros comparativos dentro de la familia, con valores correspondientes a referencias internacionales.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Tabla 2. Parámetros comparativos de torres de concentración

Potencia	10 – 50	MW
Factor de planta	35 – 38	%
Eficiencia de conversión	20 – 35	%
Costos de inversión	4,000 – 7, 000	USD/kWp
Costos de operación y mantenimiento	66	USD/kW/año
Costo medio de la energía	17.4	centavos USD/kWh

### 2.2.5.7 Concentradores cilindro parabólicos

La tecnología cilindro parabólico es la más avanzada de las tecnologías de energía solar térmica debido a una considerable experiencia con el sistema y el desarrollo de una pequeña industria comercial para producir y comercializar estos sistemas. Los colectores cilindro-parabólicos se construyen en módulos que están soportados desde el suelo por pedestales simples en los extremos [15].

Los colectores cilindro parabólicos son la tecnología solar más madura para generar calor a temperaturas mayores de 400 °C en la generación de electricidad solar térmica o en procesos de aplicación de calor. La mayor aplicación de este tipo está en la planta de electricidad en el sureste de California , conocida como Solar Electric Generation System (SEGS), la cual tiene una capacidad instalada de 354 MWe [15].

El receptor de un cilindro parabólico es lineal. Por lo general, un tubo es colocado en la línea focal para formar un receptor de la superficie externa. El tamaño del tubo, y por lo tanto la relación de concentración, es determinado por el tamaño de la imagen del sol reflejada y la tolerancias de fabricación de la parábola. La superficie del receptor es típicamente plateado con recubrimiento selectivo que tiene un alto coeficiente de absorción para la irradiación solar, pero una baja emitancia de radiación térmica [15].

Un tubo de cubierta de vidrio se coloca generalmente alrededor del tubo receptor para reducir la pérdida de calor por convección desde el receptor, con lo que además se reduce el coeficiente global de pérdida de calor. Una desventaja, resultante del uso del tubo de cubierta de vidrio, es que la luz reflejada desde el concentrador debe pasar a través del vidrio antes de llegar al receptor, la adición de una pérdida de transmitancia de aproximadamente 0.9 cuando el vidrio está limpio. La envolvente del vidrio usualmente tiene un revestimiento anti-reflejante para mejorar la transmisividad. Un camino para reducir aún más la pérdida de calor por convección desde el tubo receptor y de ese modo aumentar el rendimiento del colector, especialmente para aplicaciones de alta temperatura, es evacuar el espacio entre el tubo y la cubierta de vidrio y el receptor [15].

Estos sistemas consisten en filas paralelas de espejos curvos en una dimensión para focalizar los rayos solares. Los arreglos de espejos pueden ser de más de 100 metros de largo con una superficie curva de



## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

entre 5 a 6 metros. Tuberías de acero inoxidable con un recubrimiento selectivo operan como el colector de calor (Figura 10).



**Figura 10. Concentradores cilindro parabólico**

El recubrimiento es diseñado para permitir que las tuberías absorban altos niveles de radiación solar y emitan muy poca radiación infrarroja. Las tuberías son aisladas en un contenedor de vidrio al vacío. Los reflectores y los tubos de absorción siguen al sol en conjunto [16].

Los cilindros parabólicos son la tecnología de concentración solar más madura y conforman la gran parte de las plantas actuales a nivel comercial. Sin embargo, la mayoría de las plantas existentes cuentan con un pequeño o no cuentan con almacenamiento térmico y dependen de combustible como sistema de respaldo de potencia firme.

En la tabla 3, se indican los parámetros comparativos dentro de la familia, con valores correspondientes a referencias internacionales.

**Tabla 3. Parámetros comparativos de concentradores cilindro parabólicos**

Potencia	50 – 300	MW
Factor de planta	26 – 40	%
Eficiencia de conversión	15	%
Costos de inversión	4,000 – 8, 000	USD/kWp
Costos de operación y mantenimiento	70 - 140	USD/kW/año
Costo medio de la energía	18.5	centavos USD/kWh

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

### 2.2.5.8 Concentradores tipo Fresnel lineal

Son los más jóvenes de la tecnología basado en este principio, su desarrollo inicia entre 10 o 15 años atrás, cuando el concepto fue tomado en Australia, y en Bélgica fue introducido con mayor énfasis entre las discusiones de los científicos, esta tecnología ha sido desarrollado particularmente en Europa [13].

Este tipo de sistemas se aproximan a la forma parabólica de los sistemas de cilindro, pero utilizando largas filas paralelas de espejos planos o levemente curvos, a manera de reflejar los rayos solares en un receptor lineal fijo (Figura 11).



**Figura 11. Concentradores fresnel lineal**

Este reflector a su vez dirige los rayos incidentes hasta un absorbedor donde circula el fluido de trabajo, generando directamente vapor saturado. Un diseño reciente utiliza dos receptores paralelos por cada fila de espejos lo que lo hace requerir menos superficie [17,18].

La principal ventaja de estos sistemas es que su simple diseño de espejos planos orientables y receptores fijos, requiere menores costos de inversión y facilita la generación directa de vapor, eliminando de esta forma la necesidad y costos de fluidos de transferencia e intercambiadores de calor [19,20].

Este sistema, es relativamente simple en términos de sus componentes, tiene sin embargo la desventaja que la concentración de la radiación solar no es tan fuerte como con la tecnología parabólica, entonces da temperaturas menores, y por lo tanto, bajas eficiencias son obtenidas [13].

En la tabla 4, se indican los parámetros comparativos dentro de la familia, con valores correspondientes a referencias internacionales.

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Tabla 4. Parámetros comparativos de colectores fresnel

Potencia	6 – 150	MW
Factor de planta	50	%
Eficiencia de conversión	30	%
Costos de inversión	9,000	USD/kWp
Costos de operación y mantenimiento	60 - 70	USD/kW/año
Costo medio de la energía	42 – 46	centavos USD/kWh

2.2.5.9 Energía solar en México

La energía solar térmica concentrada (CSP) posee un importante potencial de uso en México, pues el alto nivel de irradiación solar que llega al territorio nacional (Figura 12), abre la posibilidad de su aprovechamiento tanto para la producción de electricidad como combustibles limpios.



Figura 12. Radiación global media diaria en México

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

A pesar del gran potencial en México, prácticamente es nula la generación de energía eléctrica con esta tecnología. Y no se han realizado esfuerzos relevantes para aprovechar este enorme potencial.

Aunque la máxima irradiación solar se concentra en la parte norte del país, en la zona centro, donde se ubica el estado de Michoacán, también se cuenta con un nivel adecuado de irradiación, que es viable para su aprovechamiento en concentración solar.

### 2.2.6 Energía Geotérmica

La palabra geotermia se refiere al calor natural existente en el interior de la tierra. Este calor tiene dos fuentes: el colapso gravitatorio que formó la Tierra y el decaimiento radioactivo de varios isótopos en la corteza terrestre. La baja conductividad térmica de la corteza rocosa determina un tiempo de enfriamiento de miles de millones de años.

El primer dato histórico sobre la existencia de aguas termales en Etruria nos llega a través de Licofrone, un escritor griego del año 270 a.c., que habla de la existencia de un río, denominado Lynceus, que posee aguas calientes curativas.

En su más amplio sentido, la energía geotérmica define la energía que, en forma de calor, está almacenada o se genera en el seno de nuestro planeta, mostrando en la Figura 13 la configuración que se tiene de él [21].

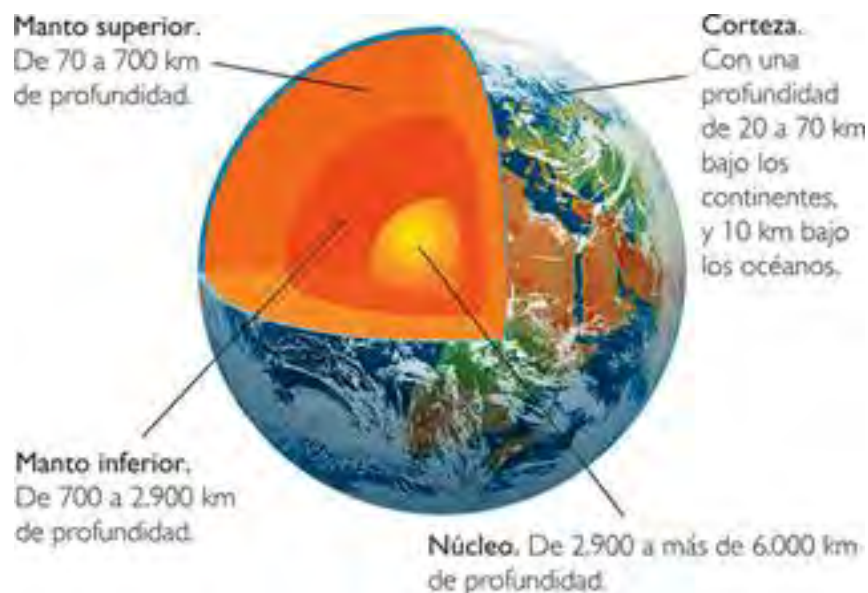


Figura 13. Estructura de la tierra

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

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

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)
- 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.

### 2.2.6.1 Clasificación de los recursos Geotérmicos

Un parámetro común para clasificar los recursos geotérmicos es la entalpía de los mismos; esta es usada para medir el estado de calor contenido por el fluido (energía geotérmica).

Los recursos geotérmicos se pueden dividir en: recursos de alta, de mediana y baja entalpía. Uno de los criterios básicos para determinar la clasificación anterior es la temperatura del fluido, varios expertos han planteado diferentes conceptos en diferentes épocas sobre el particular.

Clasificación de los recursos geotérmicos en base a la temperatura, como se muestra en la tabla 5.

**Tabla 5. Clasificación del recurso geotérmico**

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Recursos de baja entalpía	< 90	<125	<100	≤50	≤90
Recursos de entalpía intermedia	90-150	125-225	100-200	-	-
Recursos de alta entalpía	>150	>225	>200	>150	>190

Ref: (a) *Muffler and Cataldi (1978)*.  
(b) *Hochstein (1990)*.  
(c) *Benderitter and Corny (1990)*.  
(d) *Nicholson (1993)*.  
(e) *Axelsson and Gunnlaugsson (2000)*

Los yacimientos de alta entalpía se localizan en zonas de flujo de calor anómalo, mientras que los 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. 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.

La localización y evaluación de yacimientos geotérmicos requiere la aplicación de diversas técnicas, gran parte de ellas adaptadas de la investigación de hidrocarburos, aunque también de la investigación hidrogeológica y de recursos minerales.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Hay 5 cosas que un programa de exploración geotérmica debe cumplir:

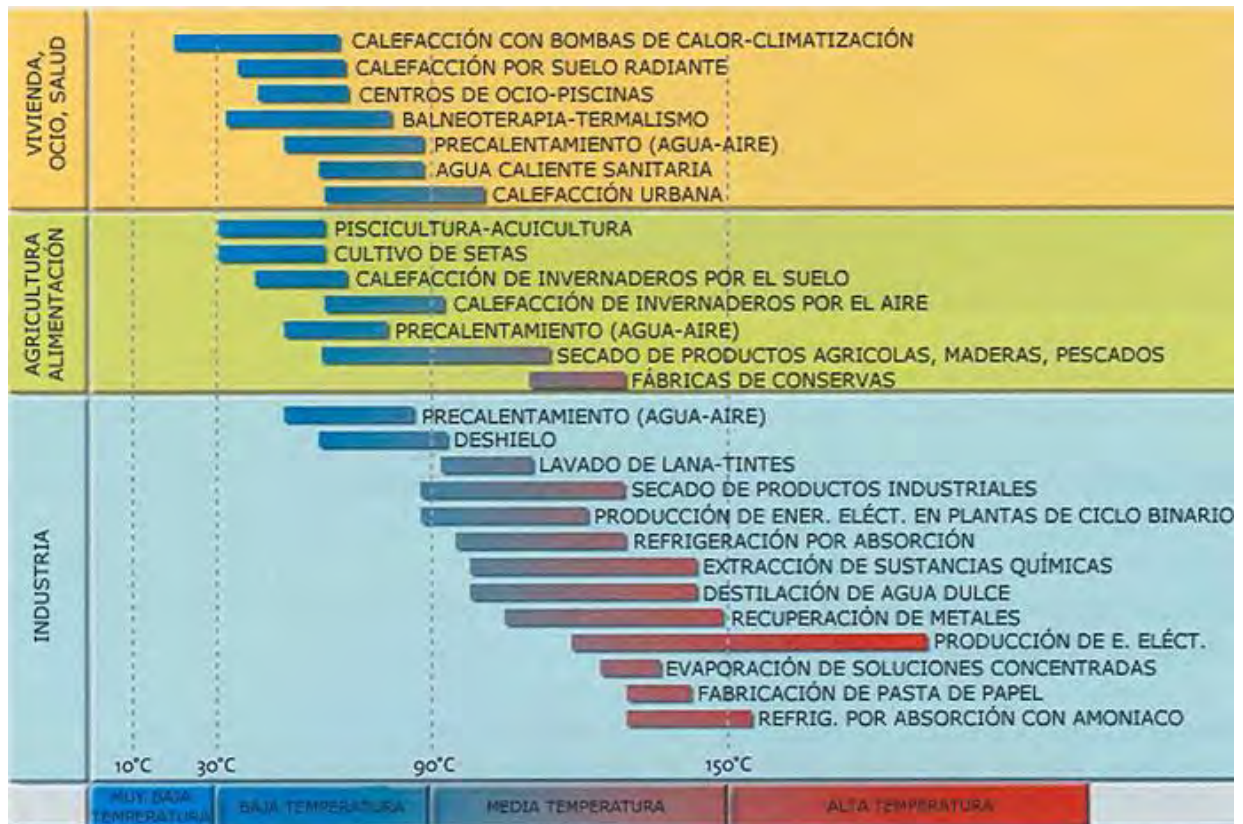
- Localizar áreas sustentadas por roca caliente
- Estimar el volumen del reservorio, la temperatura del fluido en él y la permeabilidad de la formación
- Predecir si el fluido producido será vapor seco, líquido o una mezcla de dos fases
- Definir la naturaleza química del geofluido
- Pronosticar el potencial de energía eléctrica para un mínimo de 20 años.

Las fases o pasos para un programa de exploración, de manera cronológica son, estudios literarios, estudios aéreos (fotografías aéreas de las zonas), estudios geológicos, estudios hidrológicos, estudios geoquímicos y estudios geofísicos. Cuando estos estudios han sido completados, es necesario sintetizar todos los datos adquiridos y dibujar conclusiones basadas sobre la totalidad de las evidencias. El principal propósito de sintetizar es identificar los mejores objetivos para la primer perforación de pozo profundo [22].

### 2.2.6.2 Aplicaciones de la energía geotérmica

Actualmente, los recursos geotérmicos no solamente son susceptibles de ser aprovechados en la generación de electricidad, sino también en una variedad de actividades agrupadas bajo el nombre genérico de usos directos. En la tabla 6, se presentan las principales aplicaciones de la energía geotérmica, atendiendo su clasificación y lugar donde puede ser aplicada.

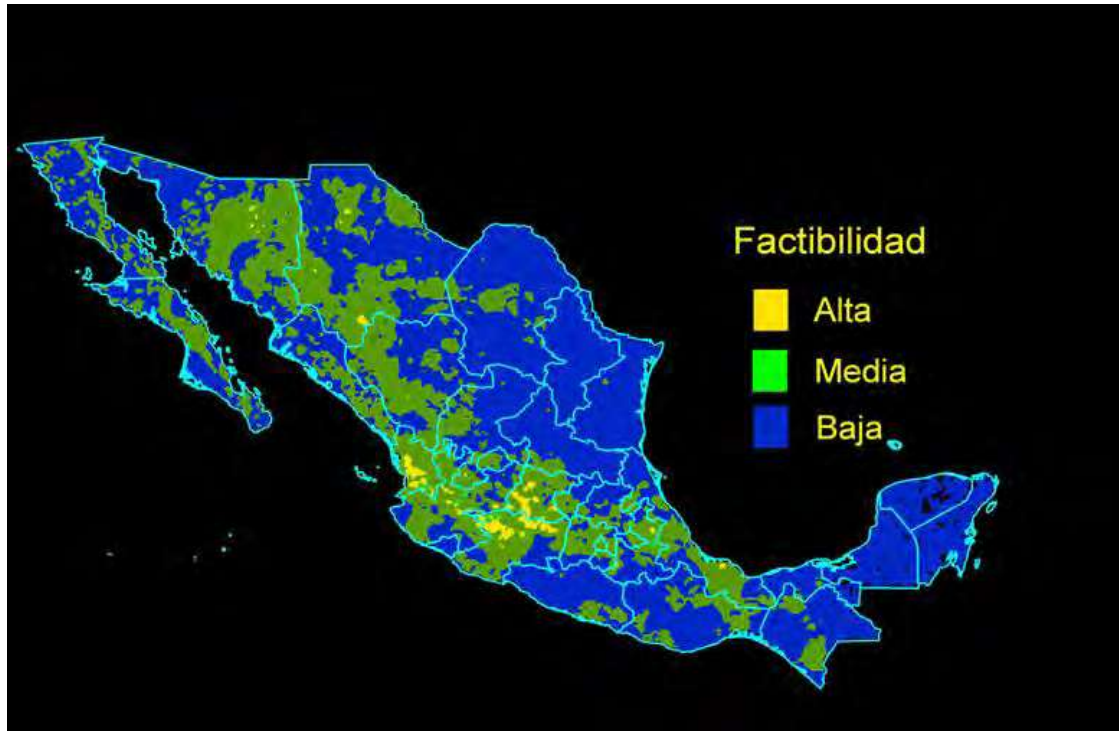
Tabla 6. Aplicaciones de la energía geotérmica



## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

### 2.2.6.3 Energía geotérmica en México

La potencia instalada en México es de 1003 MWe, que representa el 2% de la capacidad instalada en el país. México ocupa el cuarto lugar mundial en potencia geo termoeléctrica instalada [23]. En la actualidad la explotación de los recursos geotérmicos se ha enfocado a los de alta entalpía. Los usos directos que son los de mediana y baja entalpía se limitan, en la mayoría de los casos a la balneología. La capacidad instalada que se tiene es muy modesta, en comparación con el tamaño de los recursos existentes y en cuanto a la variedad de aplicaciones posibles. En la Figura 14, se muestra la distribución de factibilidad de la clasificación de los recursos geotérmicos en México.



**Figura 14. Factibilidad de recursos geotérmicos en México**

### 2.2.6.4 Energía Geotérmica en Michoacán

Actualmente se tiene instalada en Michoacán una capacidad de 188 MWe, todo esto en el campo de los Azufres, distribuidos en una unidad de condensación de 50 MWe, 4 unidades de flasheo simple 25 MWe cada una, 7 unidades a contrapresión de 5 MWe cada una y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MWe cada una. El uso se basa principalmente en recurso geotérmico de alta entalpía. Se encuentra en desarrollo la construcción de otra unidad a condensación de 50 MWe, que está por entrar en operación.

Además de los Azufres existen otras zonas con potencial geotérmico como lo son Puruandiro, Ixtlán de los Hervores, los Negritos y Araro [24], donde el uso del recurso ha sido limitado prácticamente a la balneología.

El uso de manera conjunta de dos de las principales energías renovables en el estado, energía solar y energía geotérmica, permitirían aprovechar los recursos en pro del desarrollo del estado en el uso de energías verdes.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

### 2.3 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

En el año 2014, se amplió el proyecto desarrollado en el año 2012 por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y la empresa Prados Camelinas SA de CV, con un alcance de rehabilitación de una unidad de ciclo binario con capacidad de 300 kW, adicional a la ya instalada, con el mismo principio de funcionamiento, con la única diferencia de que el campo solar, está integrado por colectores fresnel lineal.



**Figura 15. Campo de colectores fresnel**

En el año 2012 la UMSNH junto con la empresa Prados Camelinas SA de CV, integraron una Planta Híbrida Geotérmica solar para generar electricidad con una capacidad de 300 kW, en este desarrollo se integró un campo de concentradores solares cilindro parabólicos a una unidad de potencia de ciclo binario, en la región geotérmica de Araró/Simirao, el fluido caliente es primeramente suministrado desde el interior del pozo, posteriormente pasa al campo de concentradores cilindro parabólicos de manera directa, para posteriormente ser suministrado a la unidad de potencia de ciclo binario donde entrega su energía térmica para transformarla en electricidad. Esta planta híbrida es la única en su tipo en Latinoamérica que se construyó con fines de generación de energía eléctrica.



**Figura 16. Planta híbrida geotérmica solar en Simirao, Michoacán**



## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Por su lado, Giorgio Cau and Daniele Cocco compararon el rendimiento de una planta solar concentradora de medio tamaño basada en un ciclo rankine orgánico (ORC), integrada con colectores cilindro parabólico y fresnel lineal, con referencia a la energía solar disponible de Cagliari, Italia sobre un año base por medio de desarrollo de modelos específicos de simulación. Donde obtuvieron mejor producción de energía por tierra ocupada para los colectores fresnel lineal, pero mayor producción de energía por unidad de área para los colectores cilindro parabólicos, así como mejor eficiencia para los colectores parabólicos, sin desarrollar un análisis económico para ninguno de los dos sistemas [25].

G. Morin et al., efectuaron una comparación entre colectores cilindro parabólicos y colectores lineales fresnel, tomando para los colectores cilindro parabólicos, como referencia la planta de daggett/USA para generación directa de vapor con esta tecnología, teniendo datos técnicos, de operación, mantenimiento y costos de esta planta, y para el caso de los colectores lineales fresnel, tomaron la tecnología Fredesmo (instalado en la plataforma solar de Almería, España), obteniendo sus datos característicos para realizar la evaluación mediante el uso de dos software (ECOSTAR y COLSIM), y realizando así la comparación entre ellos, obteniendo mejor eficiencia en los colectores parabólicos en referencia a los dos software, pero un menor costo para el caso de los colectores fresnel lineal debido al menor costo en los soportes, dado que se considera mayor consumo de concreto para su instalación, para el caso de los colectores parabólicos [26].

En el año 2011 Najla El Gharbi et al. Realizaron un estudio comparativo entre colectores solares fresnel y cilindro parabólicos, tomando como base los datos de la región de Hassi Rmel, localizado al sur de Algeria, en este sitio, un proyecto de una planta hibrida gas natural/solar con colectores cilindro parabólicos fue instalado. Y se realizó la comparación con los datos constructivos de colectores fresnel instalados en otro lugar, con diferentes áreas de captación, donde obtuvo mejores eficiencias más altas para los colectores cilindro parabólicos [27].

En la generación de energía eléctrica utilizando colectores Fresnel lineales, Novatec (2012) opera comercialmente la estación PE2 en Murcia, con una potencia nominal de 30 MWe, es la planta eléctrica de tecnología lineal fresnel más grande del mundo. Se trata de una planta convencional de vapor cuya caldera funciona en paralelo a un receptor lineal Fresnel [28]. Su superficie primaria es de 30200 m<sup>2</sup> de espejos situados a un metro del suelo, que reflejan la luz sobre un único tubo a 7 metros de altura (Figura 17).

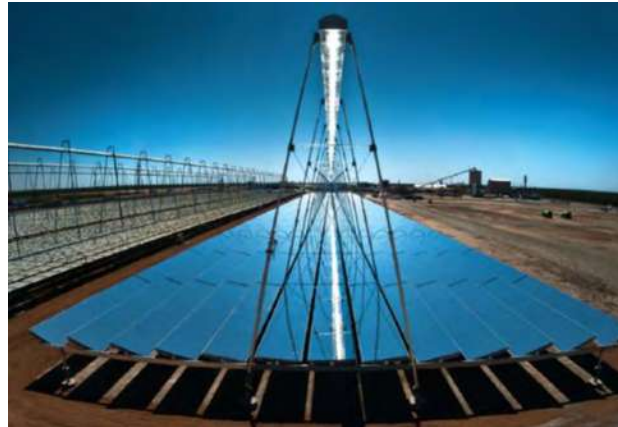


Figura 17. Vista aérea de la planta.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

En aplicaciones híbridas, geotérmica-solar, Mir et al. (2011) realizaron un análisis del desempeño de una planta híbrida geotérmica solar en Chile, localizada en el desierto de Atacama, donde además de disponer de un recurso geotérmico se cuenta con una superficie con alto nivel de radiación solar. Estimaron la producción de energía para dos diferentes configuraciones de recurso solar, añadiendo un pico de energía para una salida geotérmica constante [29].

El primer proyecto de energía solar de cierta envergadura que EEUU efectuó después de veinte años de estar paralizado en cuestiones de energía solar, fue la planta Kimberlina, en Bakersfield, California (Figura 18), que comenzó a operar en 2008. La potencia nominal de la planta es de 5 MWe, con un rendimiento del 20 %.



**Figura 18. Colectores fresnel (Kimberlina)**

Es importante el mencionar el complejo solar de generación de energía eléctrica más grande del mundo, el solar Energy Generating Systems (SEGS). Consta de nueve plantas en el desierto de Mojave, California, (Figura 19) donde la insolación es de las más altas de los EEUU. Todas las plantas del complejo fueron construidas por Luz Industries entre 1984 y 1991. La potencia total instalada es de 354 MW, aunque la potencia media suministrada a la red es de 75 MW. Las instalaciones tienen un total de 936384 espejos y cubren más de 6.5 Km<sup>2</sup>. El fluido caloportador alcanza temperaturas de 290 °C.



**Figura 19. Colectores de la planta SEGS**

---

---

## CAPITULO 3 REGIÓN GEOTÉRMICA Y ANALISIS TÉRMICO

---

---

### 3.1 REGIÓN GEOTÉRMICA DE ESTUDIO

Dado que Michoacán es uno de los estados con mayor producción de energía eléctrica con el aprovechamiento del recurso geotérmico, es viable para desarrollar este proyecto. Cuenta con varias zonas con manifestaciones geotérmicas, razón por la cual se realizó una búsqueda bibliográfica, así como de estudios de las zonas que pudiesen ayudar para definir cuál de estas zonas es la más adecuada para la aplicación de nuestra comparación.

Debido a que la zona con mayor actividad geotérmica, además de tener plantas geotérmicas para la producción de energía eléctrica en Michoacán, corresponde a la zona de los Azufres, se podría visualizar como la región más apta, por su gran potencial geotérmico, pero como la mayoría de su recurso es de alta entalpía, no sería viable la aplicación de este proyecto, dado que el estudio está orientado al aprovechamiento de recurso geotérmico ya sea de mediana o baja entalpía, además de que económicamente no sería un proyecto redituable, porque que la principal explotación en esta zona está enfocado principalmente a recursos de alta entalpía.

Otras zonas con potencial geotérmico de baja y media entalpía en el estado de Michoacán, son Puruandiro, Ixtlan de los Hervores, los Negritos, la zona del lago de Cuitzeo y Araro, donde su uso del recurso ha sido limitado prácticamente a la balneología.

Las regiones que corresponden a las zonas geotérmicas de Puruandiro, Ixtlan de los Hervores y los Negritos, son zonas buenas para la aplicación de este proyecto, pero la distancia de la ciudad de Morelia, para el desarrollo de este proyecto sería una gran limitante ya que no se tiene bastante información referente a esas zonas en cuestiones de condiciones meteorológicas y estimaciones de recursos geotérmicos, que son importantes para nuestro estudio, es por ello que para este trabajo han sido descartadas.

En lo referente a las zonas del Lago de Cuitzeo y Araro, dado su cercanía con la ciudad de Morelia son las zonas más viables para la determinación de algunos parámetros específicos y, en caso de faltar alguno, su costo de traslado para poder determinarlo no sería tan alto. Por lo anterior, se realizó una búsqueda con mayor detalle de estas dos zonas.

La zona del Lago de Cuitzeo, está localizada en la porción nororiental el Estado de Michoacán, en los límites con el Estado de Guanajuato, entre los paralelos 19°50'30" y 20°00'00" de latitud norte y los meridianos 100°56'00" y 101°20'00" de longitud oeste: con una superficie aproximada de 756 Km<sup>2</sup>. La zona cuenta con varios puntos de manifestaciones termales. Enumerando las principales, se encuentra una a 1 km al W de Estación Querendaro, la siguiente ubicada a 2 km al NW de San Agustín del Pulque, otras en el área perteneciente a San Juan Tarameo, otra ubicada en el área entre San Sebastián-El salitre y otra a 1.5 km al NE del poblado denominado San Agustín del Maíz.

Estas manifestaciones termales serían una base importante para definir esta zona como la región más adecuada para el desarrollo de este trabajo. Ya que se contaría de manera directa con la fuente geotérmica de mediana entalpía para la evaluación de las tecnologías solares, determinando parámetros en específico que se pudieran requerir en este estudio.

En lo que se refiere a la zona de Araró, se localiza a 39 km de la ciudad de Morelia, Mich., y a 4 km al N de Zinapécuaro, Mich.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Araro fue explorado por la CFE desde 1976 a 1981 y de 1989 a 1991, la exploración del pozo Z-2 fue perforado en un lugar situado a 5 Km al este del área de Simirao. En el segundo periodo nuevos estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos fueron realizados, incluyendo la perforación de 5 pozos (150- 200 m) de gradientes del pozo y otra perforación (Z-3) localizado en el área de Simirao (Ver Figura 13). Fue programado hasta una profundidad de 2000 m de profundidad, pero fue terminado a 1344 m de profundidad debido a las bajas mediciones de temperatura, alrededor de 150 °C.

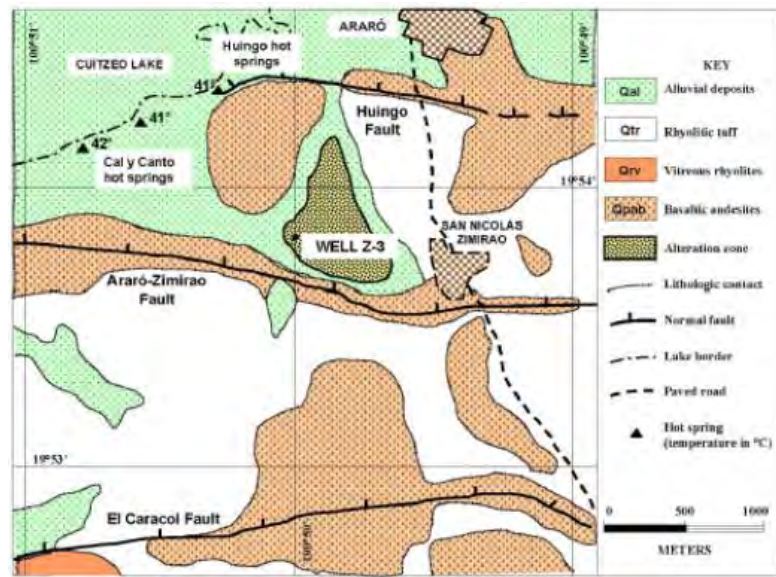


Figura 20. Mapa geológico generalizado en la zona geotérmica de Araro

En este lugar, en el año 2012 se rehabilitó una unidad de ciclo binario con capacidad de 300 kW, acoplándola a un campo de concentradores solares cilindro-parabólicos, con la finalidad de dar un incremento térmico al fluido geotérmico del pozo (Z-3).

En el año 2013, se participó en un proyecto en la convocatoria de Estímulos a la Innovación y Desarrollo Tecnológico de Conacyt con la finalidad de ampliar el campo de captación solar incluyendo colectores lineales fresnel para realizar la comparación de su desempeño térmico y económico.

Teniendo estos antecedentes para esta zona, con el recurso de fluido geotérmico, además de 2 campos de concentradores solares, uno con cilíndrico-parabólico y otro con fresnel lineales, que son el objetivo del presente caso estudio, se determinó esta zona como la “Región de Estudio”.

### 3.2 CONDICIONES METEREOLÓGICAS

De acuerdo a la región geotérmica de estudio, se obtuvieron sus condiciones climáticas, para ello se apoyó de una estación meteorológica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, realizando una comparación in situ de estos valores con un anemómetro, donde las mediciones tuvieron una variación muy pequeña en cuanto a valores, lo que permite, tener como válidos los valores que la estación meteorológica arroja, mostrando a continuación algunas gráficas de datos que son importantes para el desarrollo del análisis térmico, los parámetros mostrados en estas gráficas son de manera mensual, referente a los meses de abril, mayo y junio del año 2015.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Las gráficas de la Figura 21 a la 24 muestran la temperatura ambiente de datos obtenidos con la estación meteorológica, ya mencionada

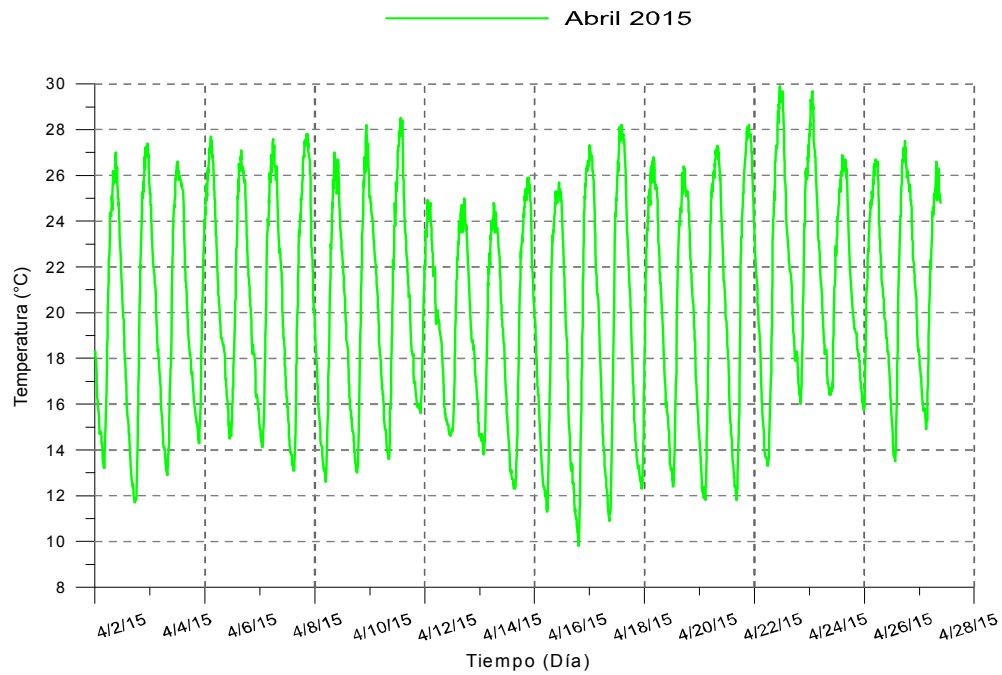


Figura 21. Gráfica de temperatura ambiente de abril 2015

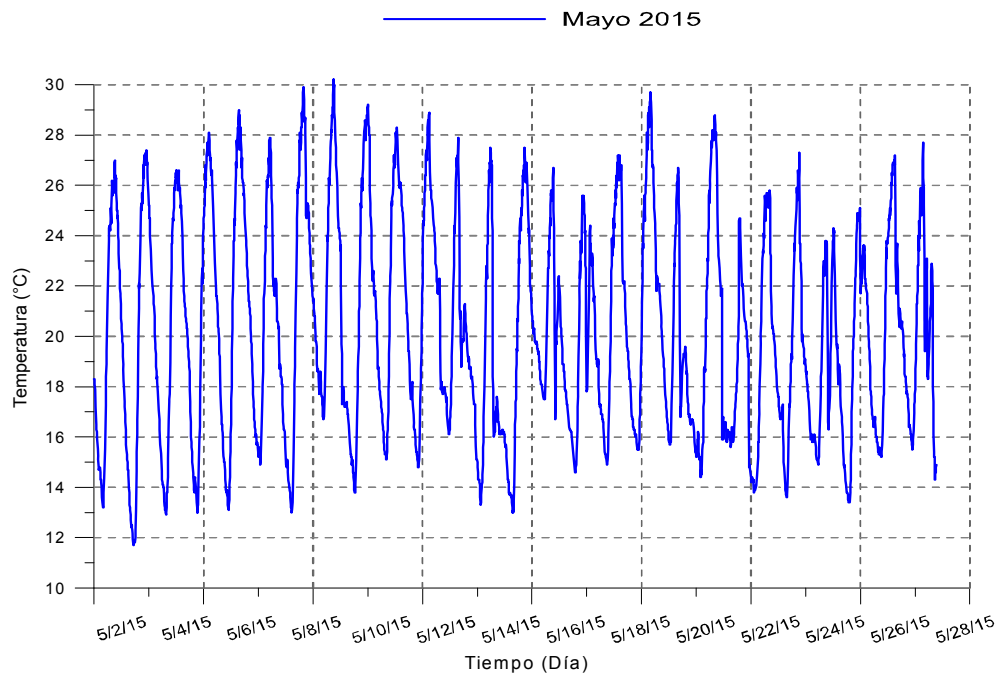


Figura 22. Gráfica de temperatura ambiente de mayo 2015

# COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

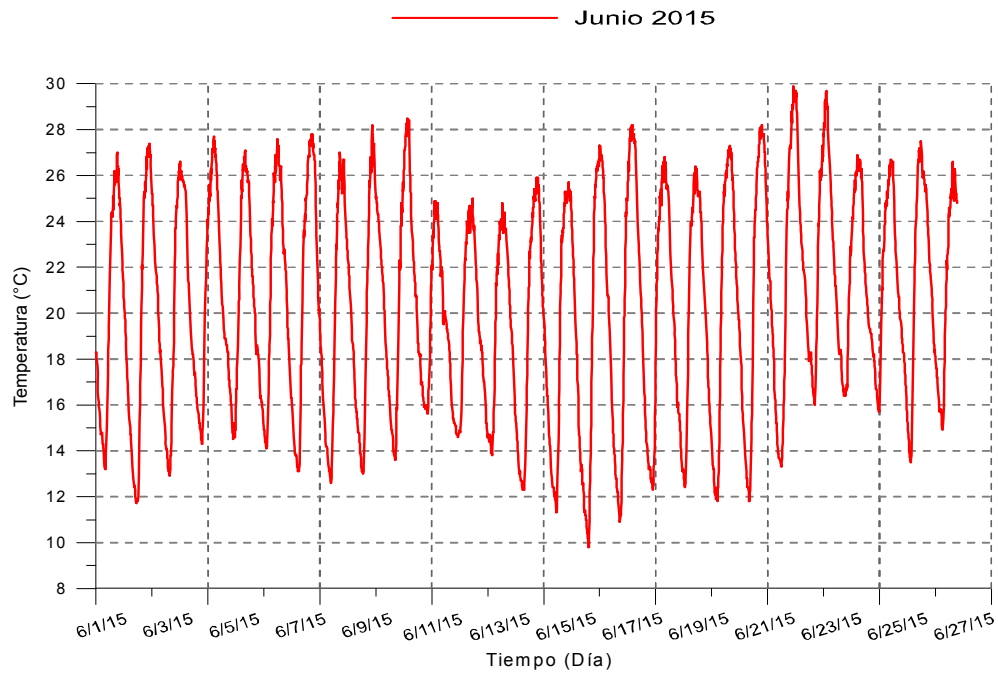


Figura 23. Gráfica de temperatura ambiente de junio 2015

De la Figura 24 a la 26 se muestran los datos referentes a la presión atmosférica para el lugar definido del presente proyecto, con apoyo de la estación meteorológica.

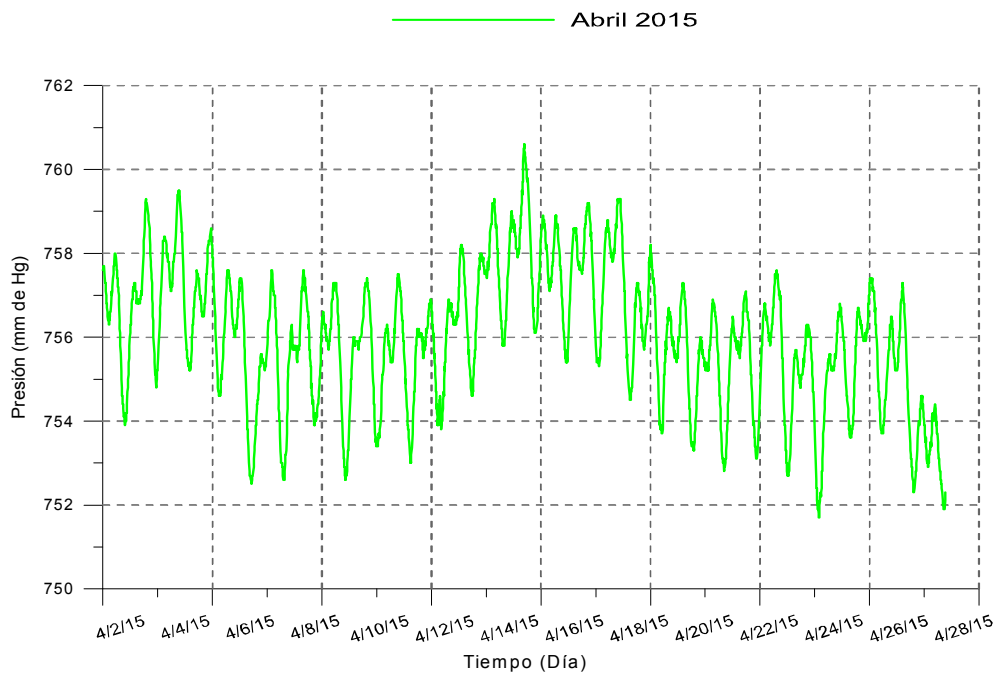


Figura 24. Gráfica de presión atmosférica de abril 2015

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

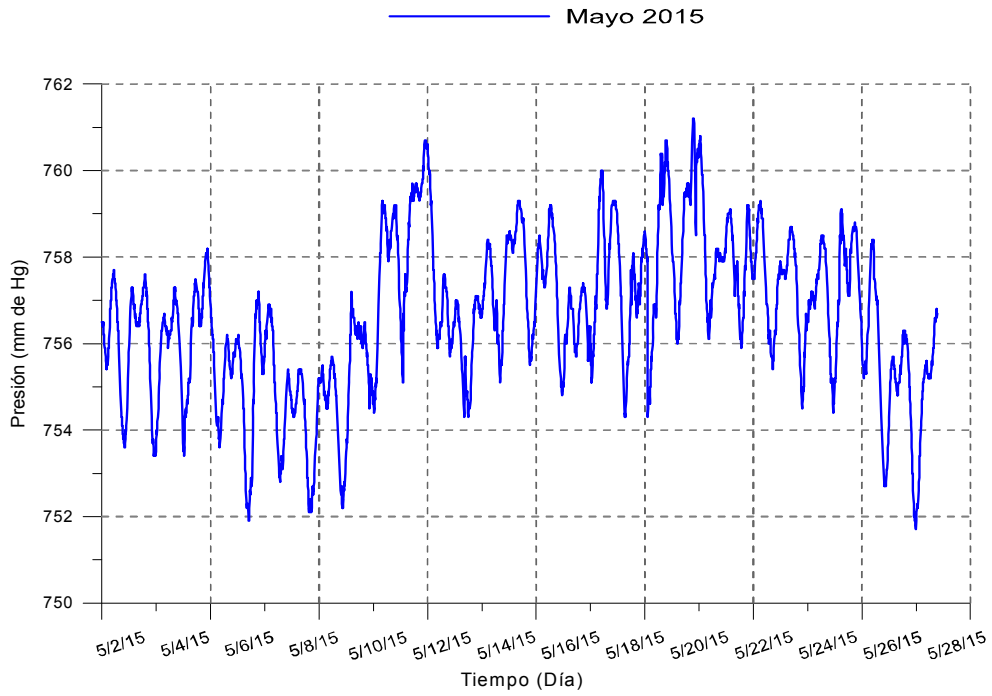


Figura 25. Gráfica de presión atmosférica de mayo 2015

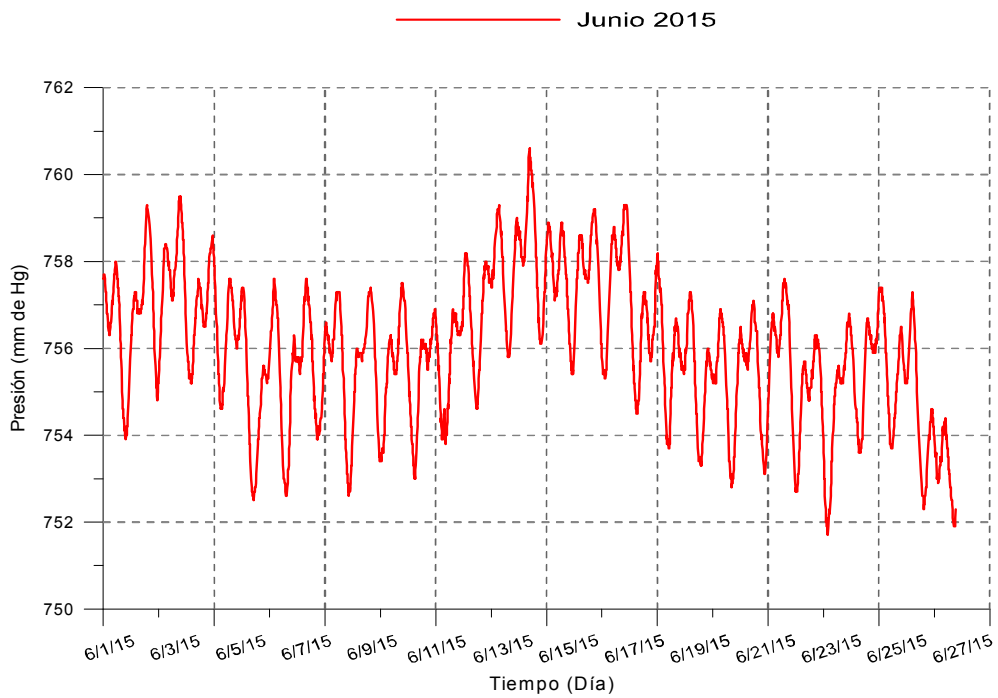


Figura 26. Gráfica de presión atmosférica de junio 2015

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

De la Figura 27 a la 29 se muestran gráficas para la velocidad del viento, un parámetro muy importante para determinar las pérdidas de energía que se tiene en los colectores.

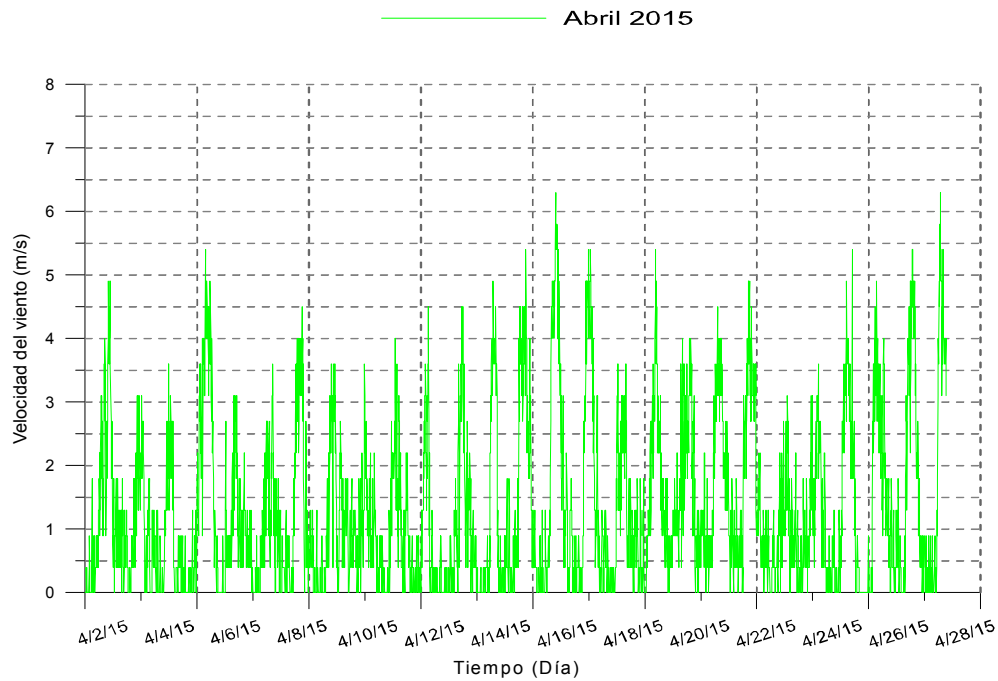


Figura 27. Gráfica de velocidad del viento de abril 2015

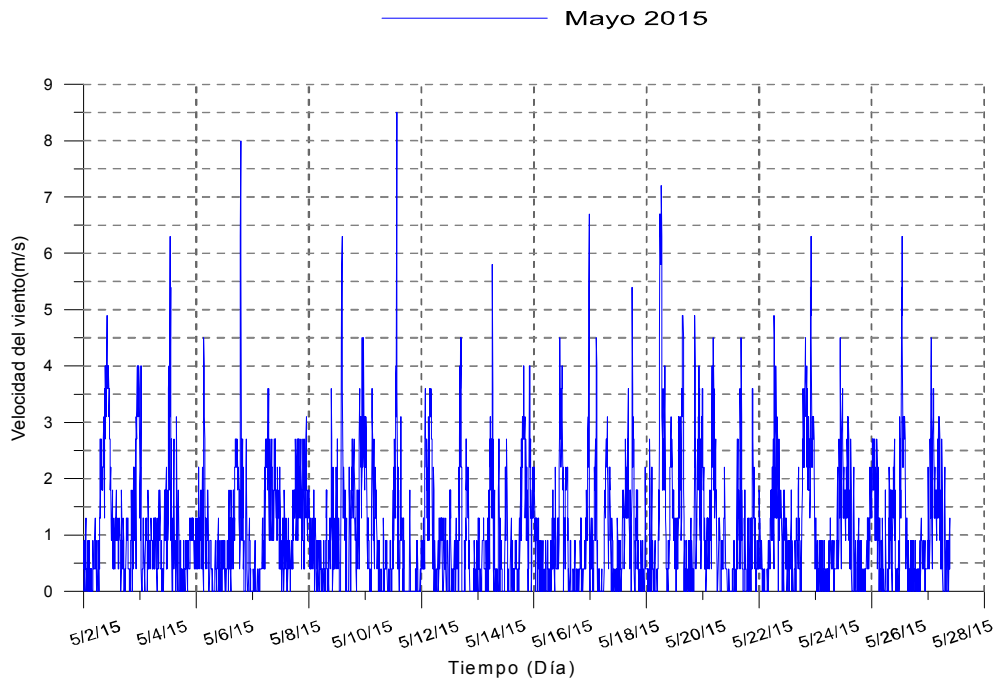


Figura 28. Gráfica de velocidad del viento de mayo 2015



# COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

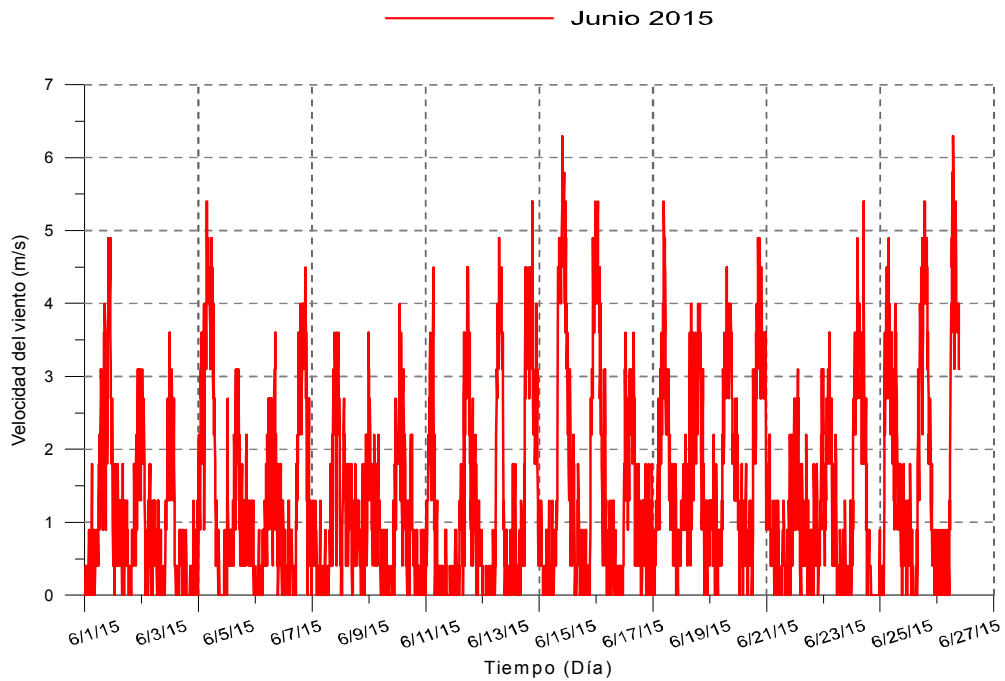


Figura 29. Gráfica de velocidad del viento de junio 2015

En las figuras de la 30 a la 32, se muestran las gráficas de uno de los parámetros más importantes para la determinación de la eficiencia térmica del colector, refiriéndose a la irradiación solar que se tiene para la región de estudio.

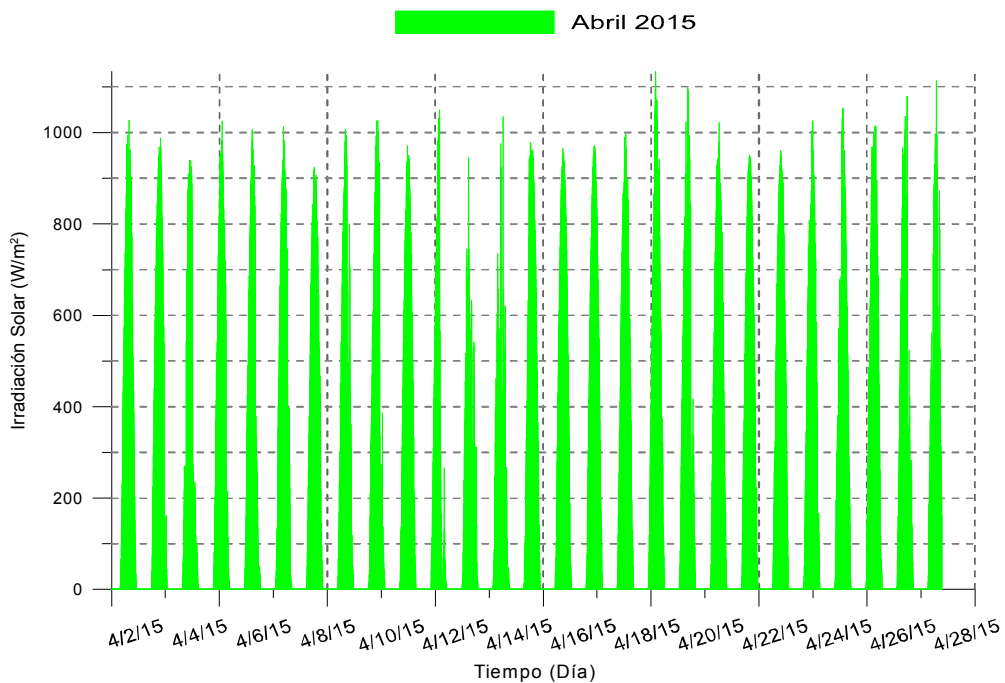


Figura 30. Gráfica irradiación solar de abril 2015

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

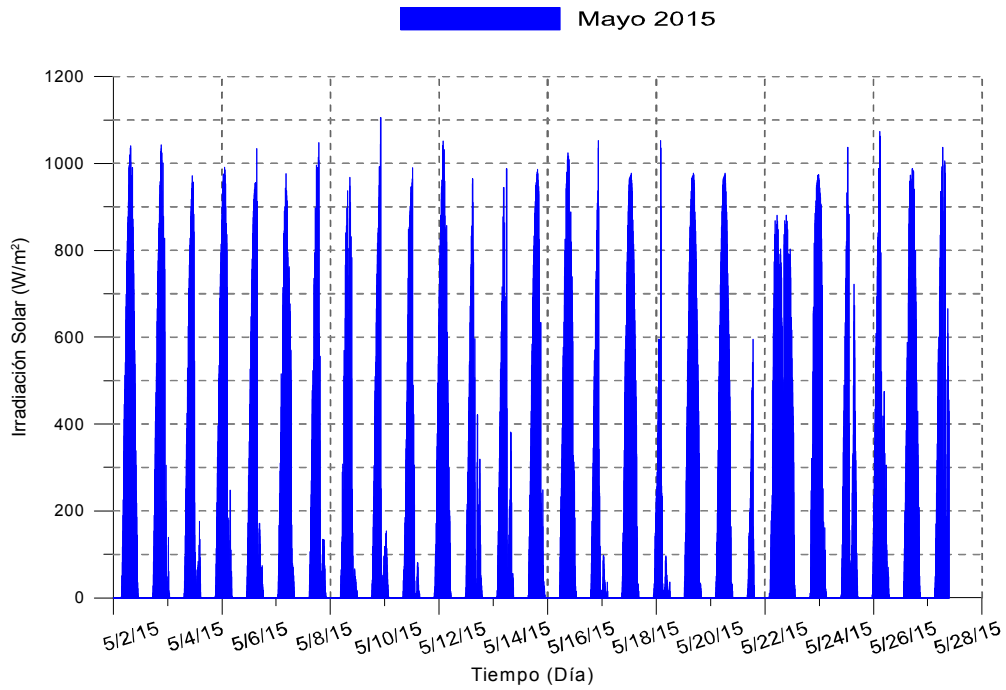


Figura 31. Gráfica irradiación solar mayo 2015

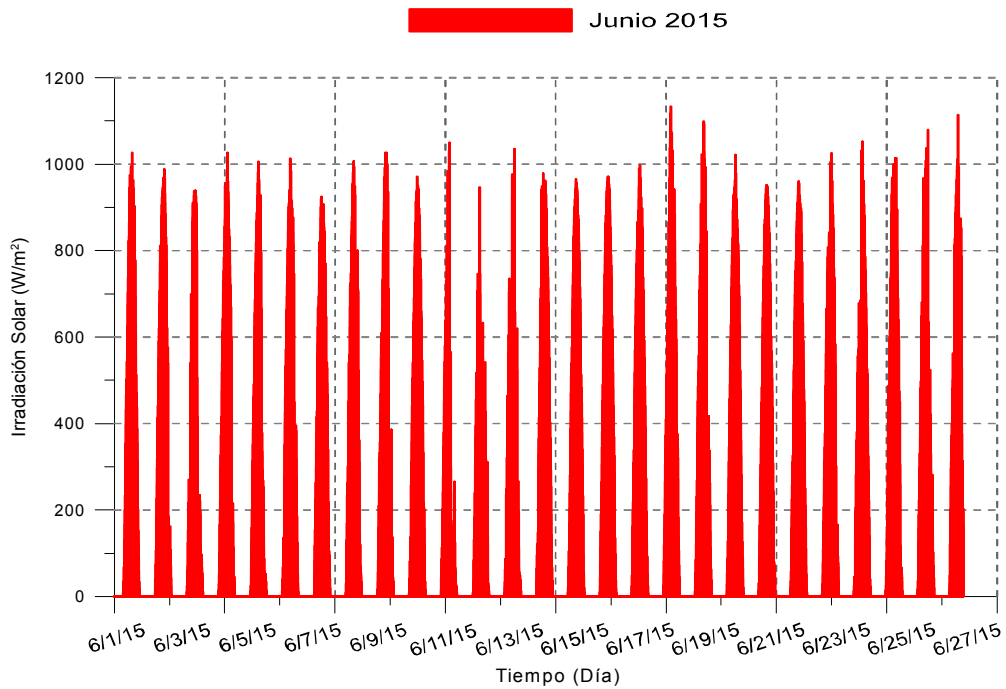


Figura 32. Gráfica irradiación solar junio 2015

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Con la referencia de estos parámetros meteorológicos, se puede realizar la evaluación tanto óptica como térmica para cualquier día del año, ya que se tienen registros hasta la fecha del año en curso (2015).

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS CAMPOS SOLARES

Referente a la primera planta híbrida geotérmica solar, instalada en la zona de Simirao, el campo solar está conformado por colectores cilindro parabólicos, tipo Power Trough 110, útil en aplicaciones industriales y comerciales de energía térmica desde 60 hasta 200 °C. Diseño desarrollado por la empresa Inventive Power de Guadalajara, México, que tiene su tecnología superior a lo disponible actualmente en el mercado para el calentamiento de agua, en calor para deshidratación o generación de vapor. Esta empresa además de desarrollar el diseño del tipo de colector parabólico fue la encargada del montaje del campo.

En la Figura 33 y 34 se muestra el campo de colectores solares cilíndrico parabólicos y la imagen de un solo colector respectivamente, instalados en la planta híbrida geotérmica-solar, de Simirao, Michoacán.

En lo referente al proyecto de ampliación del campo solar, la misma empresa fue la encargada nuevamente de suministrar y realizar el montaje del campo de colectores, pero ahora con un tipo de tecnología diferente, es decir, colectores fresnel lineal, tipo Power F22, en la Figura 35, se puede observar el campo de colectores instalados en Simirao, Michoacán.

El control electromecánico de rastreo solar (Power Tracker), también fue diseñado y montado por la empresa antes mencionada.

#### 3.3.1 Campo de colectores cilindro parabólicos

El campo de concentradores solares cilindro parabólicos, abarcan una superficie de 740 m<sup>2</sup>, conformado de 11 líneas en paralelo con 10 colectores en serie cada una.



Figura 33. Campo de colectores cilindro parabólicos

Los parámetros principales de los colectores solares parabólicos son:

Apertura del colector parabólico,  $W_a = 1.23 \text{ m}$

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Longitud del colector,  $L = 3.1 \text{ m}$

Diámetro externo del tubo receptor,  $D_{ext,r} = 0.033 \text{ m}$

Diámetro interno del tubo receptor,  $D_{int,r} = 0.030 \text{ m}$

Distancia focal,  $f = 0.341 \text{ m}$

Diámetro externo de la cubierta de cristal,  $D_{ext,v} = 0.044 \text{ m}$

Diámetro interno de la cubierta de cristal,  $D_{int,v} = 0.038 \text{ m}$

Material del tubo absorbedor: AISI 304

Superficie reflejante: lámina de aluminio anodizada



Figura 34. Colector power trough 110

### 3.3.2 Campo de colectores fresnel lineales

El campo de concentradores lineales fresnel, abarcan una superficie  $280 \text{ m}^2$  y constan de 9 módulos en paralelo con 12 líneas de espejos cada uno, con 4 tubos receptores, con una misma entrada y salida.



Figura 35. Campo de concentradores fresnel lineales

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Dimensiones principales de colectores solares parabólicos:

Apertura del colector fresnel,  $W_{a,f} = 0.40 \text{ m}$

Longitud del colector,  $L = 4.00 \text{ m}$

Diámetro externo del tubo receptor,  $D_{ext,r,f} = 0.04826 \text{ m}$

Diámetro interno del tubo receptor,  $D_{int,r,f} = 0.04272 \text{ m}$

Distancia focal,  $f = 4.00 \text{ m}$

Material del tubo absorbedor: ASTM A53 GrB

Superficie reflejante: lámina de aluminio anodizada



Figura 36. Colector power F22

Para tener un parámetro que permita realizar la comparación entre estos dos tipos de colectores, dada que en la instalación actual se tienen diferentes áreas de captación entre ellos, fue necesario igualar el área de captación efectiva entre los colectores, mediante un arreglo de tuberías para la situación experimental.

El área de utilización de los colectores Fresnel para la comparación fue solamente una sección de los espejos instalados, una superficie efectiva de captación de  $76.8 \text{ m}^2$ , que corresponde a 4 módulos del campo de colectores Fresnel.

Al utilizar dos líneas de campo de colectores parabólicos de acuerdo a las dimensiones mencionadas, se tiene un área de captación efectiva de  $76.26 \text{ m}^2$ .

Lo que nos da una relación de área efectiva ( $A_{a,f}/A_a$ ) entre los colectores de 0.74 %, un valor de diferencia de áreas adecuado para los cálculos que se desean realizar.

Partiendo de los datos anteriores, fue posible desarrollar una evaluación del análisis termodinámico del sistema, para lo cual es requerido el desarrollo del rendimiento óptico y térmico para los colectores solares [30].

### 3.4 RENDIMIENTO ÓPTICO

Los colectores concentradores tienen propiedades ópticas que varían sustancialmente con la geometría de los dispositivos [10]. Las características ópticas del colector cilíndrico parabólico están definidas por la geometría del diseño. Definen el comportamiento del sistema cuando recibe energía (área de apertura) y cómo la transmite hacia el receptor. El rendimiento óptico viene dado por el producto de factores, como reflectividad de los espejos, transmisividad del tubo de vidrio, el factor de intercepción y absorptividad de la superficie selectiva que cubre el tubo metálico absorbente [30].

#### 3.4.1 Colector cilindro parabólico

Uno de los parámetros más representativos de este análisis es la concentración que puede alcanzar el sistema. La razón de concentración es definida como la razón de área de apertura al área del absorbedor, tal como lo representa en la ecuación (1),

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (1)$$

Por lo tanto, la razón de concentración, se puede definir de la siguiente manera:

$$C = \frac{W_a * L * NC * NL}{\pi * D * L * NC * NL} = \frac{W_a}{\pi * D} \quad (2)$$

La eficiencia óptica es definida como la razón de la energía absorbida por el receptor a la energía incidente sobre la apertura del colector. Viene dada por el producto de factores, como reflectividad de los espejos ( $\rho$ ), transmisividad del tubo de vidrio ( $\tau$ ), el factor de intercepción ( $\gamma$ ) y absorptividad de la superficie ( $\alpha$ ) que cubre el tubo metálico absorbente [31].

Para el concentrador parabólico, la eficiencia óptica, se calcula mediante la ecuación (3) [32].

$$\eta_0 = \rho \tau \alpha \gamma [(1 - A_f \tan \theta) \cos \theta] \quad (3)$$

La reflectancia  $\rho$  del aluminio extruido y con superficie altamente reflejante que se utilizó como material reflectivo del colector construido es de 0.9, la transmitancia  $\tau$  de la cubierta para el vidrio con contenido bajo de metales es de 0.92, la absorptancia  $\alpha$  del receptor, tubo de acero inoxidable ASTM A 304L es de 0.93.

La geometría del colector dictamina el factor geométrico  $A_f$ , el cual es un área que se pierde debido a las sombras, bloqueos de la irradiación solar y pérdidas debidas a la reflexión hacia la orilla del absorbedor provocadas por el ángulo de incidencia de la irradiación solar que se representa con  $\theta$ .

Para colectores parabólicos este valor puede ser obtenido por la siguiente relación [33].

$$A_f = \frac{2}{3} W_a h_p + f W_a \left[ 1 + \frac{W_a^2}{48 f^2} \right] \quad (4)$$

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Donde;

$h_p$  = Altura de la parábola (m)

$W_a$  = Apertura del colector (m)

$f$  = La distancia focal (m)

La altura de la parábola, para nuestro caso de estudio corresponde a concentradores con ángulo de borde de 90° y se debe cumplir con  $h_p = f$  [34].

El parámetro más complejo involucrado en determinar la eficiencia óptica de un colector parabólico es el factor de intercepción, definido por errores aleatorios y no aleatorios y también por el parámetro de error universal [35]. Para determinarlo de manera analítica, se consideró la siguiente ecuación [36]:

$$\gamma = \frac{1-\cos(\phi_r)}{2\sin(\phi_r)} * \int_0^{\phi_r} \left[ \left[ \begin{array}{l} erf \left[ \frac{\sin(\phi_r)(1+\cos(\phi))(1-2*d*\sin(\phi))-\pi\beta^*(1+\cos(\phi_r))}{\sqrt{2\pi}\sigma^*(1+\cos(\phi_r))} \right] \\ - erf \left[ -\frac{\sin(\phi_r)(1+\cos(\phi))(1+2*d*\sin(\phi))+\pi\beta^*(1+\cos(\phi_r))}{\sqrt{2\pi}\sigma^*(1+\cos(\phi_r))} \right] \end{array} \right] \frac{1}{1+\cos(\phi)} \right] d\phi \quad (5)$$

Donde;

$\phi_r$  = Ángulo de borde

$d^*$  = Parámetro de error no aleatorio universal debido a la ubicación incorrecta del receptor y los errores de los perfiles del reflector ( $d^* = d_r/D$ )

$\beta^*$  = Parámetro de error no aleatorio universal debido a error angular ( $\beta^* = \beta C$ )

$\sigma^*$  = Parámetro de error no aleatorio universal ( $\sigma^* = \sigma_{es} C$ )

$C$  = Razón de concentración del colector

$D$  = Diámetro exterior del tubo receptor (m)

$d_r$  = Desplazamiento del receptor desde el foco (m)

$\beta$  = Error de alineación angular (grados)

El factor de intercepción depende del tamaño del receptor, los errores de superficie parabólica y la dispersión de radiación solar. Los errores relacionados con la superficie son aleatorios (que pueden ser representados por distribuciones normales de probabilidad) y no aleatorios (Relacionados con la construcción y operación del colector). Los errores aleatorios se identifican por cambios aparentes en el tamaño del sol, errores de dispersión causados por errores aleatorios de inclinación (Por ejemplo, distorsión de la parábola debido a cargas de viento) y efectos de dispersión asociados con superficies reflectivas [37]. Los errores no aleatorios pueden ser identificados en forma de imperfecciones del perfil del reflector, errores por desalineación y errores de ubicación del receptor. Los errores aleatorios son modelados estadísticamente, determinando la desviación estándar de la distribución de energía reflejada total, en una incidencia normal y es dada por la ecuación (6), [38].

$$\sigma_{es} = \sqrt{\sigma^2_{sun} + 4\sigma^2_{sem} + \sigma^2_{mirror}} \quad (6)$$

Donde;

$\sigma_{sun}$  = Desviación del ángulo del cono solar;

$\sigma_{sem}$  = Error por ajuste de seguimiento

$\sigma_{mirror}$  = Errores de superficie

**COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**

De acuerdo con Guven H.M. para un colector fabricado cuidadosamente,  $\sigma_{mirror} = 0.002 \text{ rad}$ ,  $\sigma_{slope} = 0.004 \text{ rad}$  y el ángulo del cono solar  $\sigma_{sun} = 0.004 \text{ rad}$ . Para este caso las consideraciones serían las siguientes  $\sigma_{mirror} = 0.006 \text{ rad}$ ,  $\sigma_{slope} = \sigma_{sem} = 0.010 \text{ rad}$  y  $\sigma_{sun} = 0.004 \text{ rad}$ , de acuerdo a la fabricación del proveedor, y de los materiales usados en los colectores.

Los errores no aleatorios son determinados por el valor del error de ángulo debido a la falta de alineación  $\beta$  (por ejemplo, el ángulo entre el rayo reflejado desde el centro del Sol y la normal del plano de apertura del reflector) y el desplazamiento del receptor desde el foco de la parábola ( $d_r$ ). La mala ubicación del perfil del reflector y del receptor a lo largo del eje Y provocan errores que esencialmente tienen el mismo efecto en un parámetro que es usado para contabilizar las dos. Por lo tanto, el cálculo de los parámetros para la determinación del factor de intercepción es:

El ángulo de borde ( $\phi_r$ ) puede ser calculado por la siguiente ecuación [10];

$$\phi_r = \tan^{-1} \left[ \frac{8 \left( \frac{f}{W_a} \right)}{16 \left( \frac{f}{W_a} \right)^2 - 1} \right] \quad (7)$$

Parámetro de error no aleatorio universal:

$$\sigma^* = \sigma * C \quad (8)$$

Parámetro de error no aleatorio universal debido a la ubicación incorrecta del receptor y los errores de los perfiles del reflector, calculado de la manera siguiente:

$$d^* = d_r / D \quad (9)$$

Los parámetros de los errores  $d_r$  y  $\beta$  fueron estimados tomando como consideración el procedimiento desarrollado por Jaramillo, et al. [31,39]. Estos parámetros son comparados con valores dados en la literatura, como lo muestra la tabla 7, para este proyecto, de acuerdo a la instalación que se tiene en campo, se consideran los valores mostrados en la última columna de la tabla.

**Tabla 7. Comparación de parámetros de errores**

Parámetro	Parámetros dado por Güven [33]	Parámetros dados por Brooks [40]	Parámetros dados por Jaramillo [31], [39]	Para este trabajo
$d_r$ (mm)	3.10	7.75	7.50	7.25
$\beta$ (°)	0.25	0.375	0.50	0.55

El parámetro de error no aleatorio universal debido a error angular, es calculado con:

$$\beta^* = \beta * C \quad (10)$$

Para determinar la eficiencia óptica, aún es necesario determinar el ángulo de incidencia  $\theta$ , el cual varía dependiendo del tipo de espejos del colector y de la dirección del colector Este-Oeste o Norte-Sur [30]. En este caso la dirección es Este-Oeste, en términos del ángulo de declinación y del ángulo horario:

$$\cos\theta = \sqrt{1 - \cos^2(\delta)\text{sen}^2(h)} \quad (11)$$



**COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**

La declinación  $\delta$  es la posición angular al mediodía solar, respecto al plano del ecuador. Su valor varía entre  $-23.15^\circ \leq \delta \leq 23.15^\circ$ , que puede ser encontrada de manera aproximada desde la ecuación de Cooper (1969) [10]:

$$\delta = 23.45^\circ \operatorname{sen} \left( 360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (12)$$

O también puede ser calculada de manera más aproximada con la ecuación de Spencer (1971) [10]:

$$\delta = (180/\pi)(0.006918 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \operatorname{sen} B - 0.006758 \cos 2B + 0.000907 \operatorname{sen} 2B - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \operatorname{sen} 3B) \quad (13)$$

Donde  $B$  es calculado de la ecuación (14) [10]:

$$B = (n - 1) * \frac{360}{365} \quad (14)$$

El día del año  $n$  puede ser convenientemente obtenido con la ayuda de la tabla 8.

**Tabla 8. Valores de  $n$  por meses**

Meses	$n$ , día del año
Enero	$i$
Febrero	$31+i$
Marzo	$59+i$
Abril	$90+i$
Mayo	$120+i$
Junio	$151+i$
Julio	$181+i$
Agosto	$212+i$
Septiembre	$243+i$
Octubre	$273+i$
Noviembre	$304+i$
Diciembre	$334+i$

El ángulo horario  $h$ , es el desplazamiento angular del Sol Este u Oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje en  $15^\circ$  por hora, negativo en las mañanas y positivo por las tardes [10], calculado con la ecuación (15) [41].

$$h = 15 * (h_s - 12) \quad (15)$$

Donde  $h_s$ , es la hora del día, donde se considera que las horas útiles van desde las 7:00 horas hasta las 17:00 horas. En la tabla 9, se hace la distribución para el ángulo horario de acuerdo a las horas del día:

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Tabla 9. Ángulo horario en grados

Horas	$h$ , ángulo horario (°)
6	-90
7	-75
8	-60
9	-45
10	-30
11	-15
12	0
13	15
14	30
15	45
16	60
17	75
18	90

Hasta este momento se ha descrito el procedimiento para realizar el cálculo de la eficiencia o rendimiento óptico del colector cilindro parabólico. A continuación se describirá el procedimiento para el colector fresnel lineal.

### 3.4.2 Colector fresnel lineal

Para el cálculo de la eficiencia óptica para el colector fresnel, hay algunos parámetros que serán iguales que los tomados en el análisis de los colectores cilindro parabólicos, para los valores diferentes pero con la misma nomenclatura en las fórmulas que son utilizadas en el análisis óptico de los colectores cilindro parabólico y fresnel, se agregará un subíndice  $f$  para los valores del colector fresnel.

La razón de concentración para el colector fresnel, se calcula de la siguiente manera:

$$C_f = \frac{W_{a,f} * L_f * NC_f * NL_f}{\pi * D_{ext_f} * L_f * NC_f * NR_f} = \frac{W_{a,f} * NL_f}{\pi * D_{ext_f} * NR_f} \quad (16)$$

La eficiencia óptica del colector fresnel es definida como la razón de la energía absorbida por el receptor a la energía incidente sobre la apertura del colector. La eficiencia óptica se calcula mediante la ecuación (17), con la emisividad y emitancia correspondiente a este tipo de colectores, dado que no se tiene cubierta de vidrio, no se toma en cuenta la transmisividad [27].

$$\eta_{0,f} = \rho_f \alpha_f \gamma_f \cos \theta_f \quad (17)$$

Para el caso del colector Fresnel, los valores serán de acuerdo a la información facilitada por el proveedor, reflectancia  $\rho_f$  del aluminio extruido y con superficie altamente reflejante que se utilizó como material reflectivo del colector construido, es de 0.92, la absorptancia  $\alpha_f$  del receptor, tubo de acero al carbón es de 0.90.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

El parámetro más complejo involucrado en determinar la eficiencia óptica de un colector fresnel al igual que el parabólico es el factor de intercepción  $\gamma_f$ . Para determinarlo de manera analítica, se consideró la misma ecuación (5).

El ángulo de incidencia del espejo fresnel es evaluado como una función del colector cilíndrico parabólico [27], dado por la siguiente ecuación:

$$\cos\theta_f = F\cos\theta \quad (18)$$

Donde F es un factor empíricamente evaluado [42] y para nuestro caso de 0.72, de acuerdo a mediciones experimentales realizadas en la zona de Simirao, Michoacán, realizando un proceso inverso, partiendo de las mediciones de campo, donde se obtuvieron las temperaturas de entrada ( $T_i$ ) y salida ( $T_o$ ), calculando con ellas el calor útil ( $Q_u$ ), posteriormente las eficiencias térmicas ( $\eta$ ), de ahí las eficiencias ópticas ( $\eta_0 - \eta_{0,f}$ ), los ángulos de incidencia ( $\theta - \theta_f$ ) y de ahí se determinó el factor empírico.

Con la finalidad de realizar el cálculo de la eficiencia óptica tanto del colector parabólico como fresnel para cualquier día del año de una manera más práctica y sencilla, se elaboró un script en MATLAB, el cual se puede observar en el anexo I, que permite una interacción más manejable y comprensible para la introducción de los datos y la visualización de los resultados. Con la determinación de las características geométricas es posible el calcular algunos parámetros como el ángulo de incidencia, el ángulo horario para cada hora correspondiente, entre otras cosas.

Una vez, desarrollado el procedimiento para el cálculo del rendimiento óptico de cada tipo de colector, se hace la descripción de la manera de realizar el cálculo del rendimiento térmico de ellos.

### 3.5 RENDIMIENTO TÉRMICO

El siguiente parámetro básico a considerar es la eficiencia térmica del colector. Esta es definida como la razón de la energía útil entregada a la energía incidente sobre la apertura del colector. El flujo incidente solar consiste de radiación directa y difusa. Los colectores solares pueden solamente utilizar la radiación directa si la razón de concentración es mayor de 10 [30].

La radiación absorbida por unidad de área de apertura puede ser estimada desde la radiación y las características ópticas del concentrador y del receptor [10].

La eficiencia,  $\eta$ , de los colectores depende de la temperatura de funcionamiento del colector, de la irradiación directa normal,  $I_b$ , y del ángulo de incidencia,  $\theta$ , de la radiación solar. La eficiencia es definida como la razón de la potencia térmica absorbida por el fluido de transferencia de calor, a la irradiación directa normal en el área de apertura [27] y puede ser obtenida con la ecuación (19):

$$\eta = \frac{Q_u}{I_b A_a} \quad (19)$$

La eficiencia instantánea de un colector concentrador se puede calcular a partir de un balance de energía de su receptor. La energía útil entregada por un concentrador se estima mediante [10].

$$Q_u = I_b \eta_0 A_a - A_r U_L (T_r - T_a) \quad (20)$$

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Donde  $Q_u$  es el calor útil entregado por el colector concentrador.  $T_r$ , es la temperatura del receptor,  $T_a$ , es la temperatura ambiente. Debido a que se trata de un sistema de concentración solar se debe tomar en cuenta sólo la irradiación solar  $I_b$ .  $\eta_0$ , es la eficiencia óptica ya descrita anteriormente.  $U_L$ , es el coeficiente global de pérdida.

Las ecuaciones (19) y (20) son comunes para determinar la eficiencia térmica y el calor útil, para los colectores cilindro parabólicos y fresnel, pero hay algunos parámetros de ellas, que se deben determinar de manera diferente para cada tipo de colector, a continuación se indica la manera de calcularlos, primero para el colector cilindro parabólico y posteriormente para el colector fresnel.

### 3.5.1 Colector cilindro parabólico

Las pérdidas térmicas del colector deben ser estimadas por lo general en términos del coeficiente global de pérdida  $U_L \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ , que se basa en el área del receptor. Los cálculos deben incluir las pérdidas por radiación, conducción y convección [43].

La estimación de las pérdidas de conducción requiere del conocimiento de la construcción del colector, por ejemplo, la forma en que el receptor es soportado. Usualmente, para reducir las pérdidas de calor, un tubo concéntrico de vidrio es usado alrededor del receptor. El espacio del receptor y el vidrio esta usualmente al vacío, en tal caso las pérdidas por convección son despreciables. Para este caso,  $U_L$ , basado en el área de recepción  $A_r$ , está dado por la ecuación (21) [44]:

$$U_L = \left[ \frac{A_r}{(h_a + h_{r,v-a}) \cdot A_g} + \frac{1}{h_{r,r-v}} \right]^{-1} \quad (21)$$

Donde,  $h_a \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ , es el coeficiente convectivo de transferencia de calor debido al viento, esto es entre la cubierta de cristal y el ambiente. Obtenido como [35]:

$$h_a = \frac{Nu_a \cdot k_a}{D_{int,v}} \quad (22)$$

Dónde:

$Nu_a$  = Número de Nusselt entre la cubierta y el ambiente.

$k_a$  = Conductividad térmica del aire,  $W/m \cdot K$

$D_{int,v}$  = Longitud característica de la cubierta de vidrio del receptor o diámetro interior de la cubierta de vidrio del receptor,  $m$ .

El número de Nusselt,  $Nu_a$  para el caso de un tubo circular, está en función del número de Prandtl y del número de Reynolds, de acuerdo a la ecuación (23) [45]:

$$Nu_a = C Re_a^m Pr_a^{1/3} \quad (23)$$

Para el cálculo de los números de Prandtl y Reynolds se aplican las siguientes ecuaciones [45]:

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

$$Pr_a = \frac{Cp_a * \mu_a}{k_a} \quad (24)$$

$$Re_a = \frac{\rho_a V_a D_{int,v}}{\mu_a} \quad (25)$$

Dónde;

$Cp_a$ , Calor específico a presión constante del aire a temperatura ambiente,  $KJ/Kg * K$

$\mu_a$ , Viscosidad cinemática del aire,  $m^2/s$

$\rho_a$ , Densidad del aire a temperatura ambiente,  $Kg/m^3$

$V_a$ , Velocidad promedio del aire,  $m/s$

Las constantes  $C$  y  $m$  de la ecuación (23), para un tubo circular se toman de acuerdo a la tabla 10, [46,47]:

Tabla 10. Constantes para un tubo circular

$Re_a$	$C$	$m$
0.4-4	0.989	0.330
4-40	0.911	0.385
40-4000	0.683	0.466
4000-40,000	0.193	0.618
40,000-400,000	0.027	0.805

$h_{r,v-a} \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$ , es el coeficiente de transferencia de calor por radiación de la cubierta de cristal al ambiente, para una superficie convexa pequeña encerrada en una cóncava grande (en este caso el cielo), se utiliza la ecuación (26) [45]:

$$h_{r,v-a} = \varepsilon_v * \sigma * (T_v + T_a) * (T_v^2 + T_a^2) \quad (26)$$

Dónde:

$\varepsilon_v$ , Emisividad de la cubierta de vidrio

$\sigma$ , Constante de Stefann-Boltzmann  $\left( \frac{W}{m^2 * K^4} \right)$

$T_v$ , Temperatura de la cubierta de vidrio ( $K$ )

$h_{r,r-v} \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$ , es el coeficiente de transferencia de calor por radiación del receptor a la cubierta. Con frecuencia los problemas de transferencia de calor por radiación se encuentran estrechamente ligados con la transferencia de calor total, por lo tanto, se define el coeficiente de transferencia de calor por radiación, como

$$h_{r,r-v} = \frac{q_{r,r-v}}{A_r(T_r - T_v)} \quad (27)$$

Cuando dos cilindros concéntricos largos, intercambian calor, es posible aplicar la siguiente ecuación, para el cálculo de la transferencia de calor total:

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

$$q_{r,r-v} = \frac{\sigma A_r (T_r^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_r}{A_v} (\frac{1}{\varepsilon_v} - 1)} \quad (28)$$

Sustituyendo la ecuación (28) en la ecuación (27), se tiene el coeficiente de transferencia de calor por radiación que depende de manera muy estrecha de la temperatura, y se define por medio de la ecuación (29) [48]

$$h_{r,r-v} = \frac{\sigma (T_r^2 + T_v^2) (T_r + T_v)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_r}{A_v} (\frac{1}{\varepsilon_v} - 1)} \quad (29)$$

Dónde;

$\varepsilon_r$ , Emisividad del receptor

$A_v$ , Área exterior de la cubierta de vidrio ( $m^2$ ), dada por la ecuación (30)

$$A_v = \pi * D_{ext,v} * L * NC * NL \quad (30)$$

Dónde;

$D_{ext,v}$ , Diámetro exterior de la cubierta de vidrio,  $m$

$L$ , Longitud del receptor,  $m$

$NL$ , Número de líneas

$NC$ , Número de colectores por línea

Para calcular las propiedades de la cubierta de vidrio es necesario el calcular la temperatura de la cubierta de cristal, realizando un balance de energía entre el tubo receptor y el ambiente, se puede obtener  $T_v$  mediante el siguiente balance:

$$A_r h_{r,r-v} (T_r - T_v) = A_v (h_{r,v-a} + h_a) (T_v - T_a) \quad (31)$$

Despejando de la ecuación (31)  $T_v$ , se obtiene:

$$T_v = \frac{A_r h_{r,r-v} T_r + A_v (h_{r,v-a} + h_a) T_a}{A_r h_{r,r-v} + A_v (h_{r,v-a} + h_a)} \quad (32)$$

La ecuación (20) puede ser modificada sustituyendo la temperatura de entrada ( $T_i$ ) por la temperatura del receptor ( $T_r$ ), si se incluye un factor de corrección ( $F_R$ ). Lo que nos da un calor útil entregado por el concentrador, descrito mediante la siguiente ecuación [30]:

$$Q_u = F_R [I_b \eta_0 A_a - A_r U_L (T_i - T_a)] \quad (33)$$

Se define el factor de remoción de calor  $F_R$  como el parámetro que relaciona el calentamiento que se obtiene de manera efectiva en el colector, con el que se obtendría si toda la temperatura de entrada ( $T_i$ ) fuera la misma en toda la superficie del colector [49].

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Por lo tanto, el factor de remoción  $F_R$  se calcula, como sigue:

$$F_R = \frac{\dot{m}_w c_{p_w}}{A_r U_L} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{U_L F' A_r}{\dot{m}_w c_{p_w}}\right) \right] \quad (34)$$

Dónde;

$\dot{m}_w$ , Flujo másico del fluido de transferencia de calor,  $kg/s$

$c_{p_w}$ , Calor específico del fluido de transferencia de calor a presión constante,  $KJ/Kg * K$

$F'$ , Es un factor de eficiencia del colector

El factor de eficiencia del colector  $F'$ , viene dado por:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_{ext,r}}{h_w * D_{int,r}} + \frac{D_{ext,r}}{2K_w} \ln\left(\frac{D_{ext,r}}{D_{int,r}}\right)} \quad (35)$$

Dónde;

$D_{ext,r}$ , Diámetro exterior del receptor,  $m$

$D_{int,r}$ , Diámetro interior del receptor,  $m$

$K_w$ , Conductividad térmica del fluido,  $W/m * K$

$h_w$ , Coeficiente de transferencia de calor en el interior del tubo,  $W/m^2 * K$

La ecuación necesaria para encontrar el coeficiente de transferencia de calor entre el receptor y el tubo ( $h_w$ ), es:

$$h_w = \frac{Nu_w * K_w}{D_{int,r}} \quad (36)$$

Dónde;

$Nu_w$  = Número de Nusselt entre el receptor y el fluido.

$k_w$  = Conductividad térmica del fluido,  $W/m * K$

$D_{int,r}$  = Longitud característica del receptor o diámetro interior del receptor,  $m$ .

El número de Nusselt,  $Nu_w$  para el caso de un tubo circular, está en función del número de Prandtl y del número de Reynolds, de acuerdo a la ecuación (37) [50]:

$$Nu_w = 0.023 Re_w^{0.8} Pr_w^b \quad (37)$$

El valor del coeficiente ( $b$ ), sería de 0.3 si el fluido se enfría y de 0.4 si el fluido se calienta [45].

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Para el cálculo de los números de Prandtl y Reynolds se aplican las siguientes ecuaciones [45]:

$$Pr_w = \frac{Cp_w * \mu_w}{K_w} \quad (38)$$

$$Re_w = \frac{\rho_w V_w D_{int,r}}{\mu_w} \quad (39)$$

Dónde;

$Cp_w$ , Calor específico a presión constante del fluido,  $KJ/Kg * K$

$\mu_w$ , Viscosidad dinámica del fluido,  $m^2/s$

$\rho_w$ , Densidad del fluido a temperatura de trabajo,  $Kg/m^3$

$V_w$ , Velocidad promedio del fluido,  $m/s$

Para la determinación de la temperatura del receptor  $T_r$ , partiendo de la ecuación (20), de la cual se puede despejar  $T_r$ , y de esta manera se obtiene la siguiente ecuación, para la temperatura del receptor:

$$T_r = T_a + \frac{I_b \eta_o A_a - Q_u}{A_r U_L} \quad (40)$$

El flujo de calor ganado por el fluido de trabajo que pasa por el concentrador, se puede obtener mediante un balance de energía entre la entrada y la salida del concentrador, mediante la ecuación, indicada a continuación [44]:

$$Q_u = \dot{m}_w Cp_w (T_o - T_i) \quad (41)$$

De la cual se puede obtener la temperatura de salida ( $T_o$ ) del tramo del receptor:

$$T_o = T_i + \frac{Q_u}{\dot{m}_w Cp_w} \quad (42)$$

Para determinar los valores de las propiedades del colector es necesario estimar de manera inicial la temperatura del receptor  $T_r$  y la temperatura de la cubierta de vidrio  $T_v$ , que deberá ser muy aproximada a la temperatura ambiente  $T_a$ . Mediante un proceso iterativo, se encontrara  $T_v$  y  $T_r$  final, que no deberá de diferir mucho del estimado. En la Figura 37, se muestra el diagrama de flujo para el proceso iterativo y las condicionantes a cumplir [51], y en el anexo II se puede observar el script para la obtención de la eficiencia térmica del colector cilindro parabólico.



COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

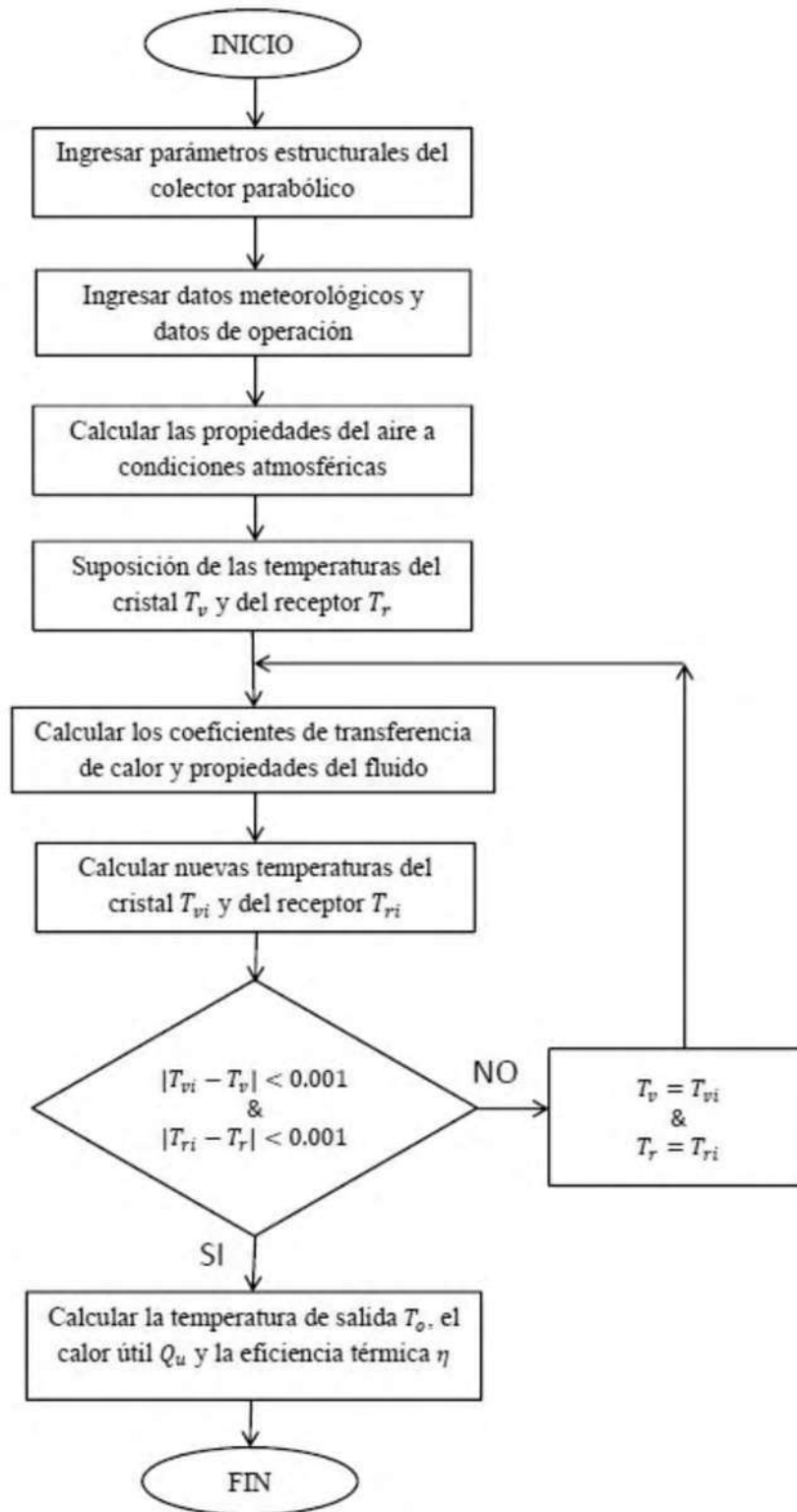


Figura 37. Diagrama de flujo para cálculo de parámetros del colector parabólico

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Se ha descrito el procedimiento para desarrollar el cálculo del rendimiento térmico del colector cilindro parabólico. En la parte siguiente, se hace la descripción para calcular la eficiencia térmica del colector fresnel lineal.

### 3.5.2 Fresnel lineal

Para los colectores lineales fresnel, de manera similar que los colectores cilindro parabólicos, las pérdidas térmicas del colector deben ser estimadas por lo general en términos del coeficiente global de pérdida  $U_L \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$ , que se basa en el área del receptor. Los cálculos deben incluir las perdidas por radiación, conducción y convección [43].

En este caso, el receptor de los colectores lineales fresnel, es un tubo desnudo, es decir, no se encuentra cubierto con una envolvente de cristal alrededor de él, de tal suerte se hacen algunas suposiciones de temperatura importantes a lo largo del receptor. El coeficiente global de pérdida para el tubo desnudo está dado por [34]

$$U_{L,f} = h_r + h_{a,f} \quad (43)$$

Donde  $h_r$  es el coeficiente de transferencia radiactiva, esta linealización del coeficiente puede ser estimado mediante [34]

$$h_r = 4\sigma\epsilon_r T_{r,f}^3 \quad (44)$$

El término,  $h_{a,f} \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$ , es el coeficiente convectivo de transferencia de calor debido al viento en los concentradores fresnel, a lo que es lo mismo entre el receptor y el ambiente. Obtenido de [35]:

$$h_{a,f} = \frac{Nu_{a,f} * k_{a,f}}{D_{int,r,f}} \quad (45)$$

Dónde;

$Nu_{a,f}$  = Número de Nusselt entre el receptor y el ambiente.

$K_{a,f}$  = Conductividad térmica del aire,  $W/m * K$

$D_{int,r,f}$  = Longitud característica de del receptor fresnel o diámetro interior del receptor fresnel,  $m$ .

El número de Nusselt,  $Nu_a$  para el caso de un tubo circular, está en función del número de prandtl y del número de Reynolds, de acuerdo a la ecuación (46), [45]:

$$Nu_{a,f} = C Re_{a,f}^m Pr_{a,f}^{1/3} \quad (46)$$

Para el cálculo de los números de Prandtl y Reynolds se aplican las siguientes ecuaciones [45]:

$$Pr_{a,f} = \frac{Cp_a * \mu_a}{K_a} \quad (47)$$

$$Re_{a,f} = \frac{\rho_a V_a D_{int,r,f}}{\mu_a} \quad (48)$$

**COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**

Dónde;

$Cp_{a,}$  Calor específico a presión constante del aire a temperatura ambiente,  $KJ/Kg * K$

$\mu_{a,}$  Viscosidad cinemática del aire,  $m^2/s$

$\rho_{a,}$  Densidad del aire a temperatura ambiente,  $Kg/m^3$

$V_{a,}$  Velocidad promedio del aire,  $m/s$

Las constantes  $C$  y  $m$  de la ecuación (46), para un tubo circular son tomados de acuerdo a la tabla 10 [46], [47]:

Para conocer el valor de la temperatura del receptor  $T_{r,f}$  en los colectores fresnel, se realiza un balance de energía en el tubo, realizando la consideración de que se tienen pérdidas con la idea de determinar una máxima temperatura, tal que:

$$\dot{m}_{w,f} Cp_{w,f} (T_{o,f} - T_{i,f}) = A_{r,f} \eta_{0,f} C_f I_b \quad (49)$$

Considerando que la razón de concentración  $C_f$ , para los colectores Fresnel líneas, es  $C_f = A_{a,f}/A_{r,f}$ , por lo tanto la ecuación (49), se convierte en:

$$\dot{m}_{w,f} Cp_{w,f} (T_{o,f} - T_{i,f}) = A_{a,f} \eta_{0,f} I_b \quad (50)$$

Donde;

$\dot{m}_{w,f}$ , Flujo másico del fluido de transferencia de calor en colectores fresnel,  $kg/s$

$Cp_{w,f}$ , Calor específico del fluido de transferencia de calor a presión constante en colectores fresnel,  $KJ/Kg * K$

$T_{o,f}$ , Temperatura a la salida de los colectores fresnel,  $K$

$T_{i,f}$ , Temperatura a la entrada de los colectores fresnel,  $K$

$A_{a,f}$ , Área de captación de los colectores fresnel,  $m^2$

De la ecuación anterior, se puede obtener la temperatura teórica de salida  $T_{o,f}$ , establecida de la siguiente manera,

$$T_{o,f} = T_{i,f} + \frac{A_{a,f} * \eta_{0,f} * I_b}{\dot{m}_{w,f} * Cp_{w,f}} \quad (51)$$

Efectuando un balance de energía tomando en cuenta el coeficiente convectivo de calor del fluido del colector fresnel, con las mismas consideraciones de las pérdidas, se tiene la siguiente ecuación [11]

$$h_{w,f} (T_{r,f} - T_{o,f}) = A_{a,f} \eta_{0,f} I_b \quad (52)$$

La ecuación necesaria para encontrar el coeficiente convectivo de transferencia de calor entre el receptor y el tubo ( $h_w$ ), es:

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

$$h_{w,f} = \frac{Nu_{w,f} * k_{w,f}}{D_{int,r,f}} \quad (53)$$

Dónde;

$Nu_{w,f}$  = Número de Nusselt entre el receptor y el fluido, en el colector fresnel.

$k_{w,f}$  = Conductividad térmica del fluido, en el colector fresnel  $\left(\frac{W}{m * K}\right)$

$D_{int,r,f}$  = Longitud característica del receptor o diámetro interior del receptor, en el colector fresnel (m).

El número de Nusselt,  $Nu_{w,f}$  para el caso de un tubo circular, está en función del número de prandtl y del número de Reynolds, de acuerdo a la ecuación (54) [50]:

$$Nu_{w,f} = 0.023 Re_{w,f}^{0.8} Pr_{w,f}^b \quad (54)$$

El valor del coeficiente (b), sería de 0.3 si el fluido se enfría y de 0.4 si el fluido se calienta [45].

Para el cálculo de los números de Prandtl y Reynolds se aplican las siguientes ecuaciones [45]:

$$Pr_{w,f} = \frac{Cp_{w,f} * \mu_{w,f}}{K_{w,f}} \quad (55)$$

$$Re_{w,f} = \frac{\rho_{w,f} V_{w,f} D_{int,r,f}}{\mu_{w,f}} \quad (56)$$

Dónde;

$Cp_{w,f}$ , Calor específico a presión constante del fluido, en el colector fresnel  $\left(\frac{KJ}{Kg * K}\right)$

$\mu_{w,f}$ , Viscosidad dinámica del fluido, en el colector fresnel  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$\rho_{w,f}$ , Densidad del fluido a temperatura de trabajo, en el colector fresnel  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

$V_{w,f}$ , Velocidad promedio del fluido, en el colector fresnel  $\left(\frac{m}{s}\right)$

Igualando las ecuaciones (50) y (52), se puede estimar la temperatura del receptor de los colectores fresnel ( $T_{r,f}$ ), de la forma siguiente

$$T_{r,f} = T_{o,f} + \frac{A_{a,f} * \eta_{o,f} * I_b}{h_w} \quad (57)$$

Una vez, determinados los parámetros para obtener la temperatura del receptor, y el coeficiente global de pérdida, el calor útil, puede ser obtenido de acuerdo a la ecuación (20), en términos de los parámetros del colector fresnel, quedando la ecuación de la siguiente manera,

$$Q_{u,f} = I_b \eta_{o,f} A_{a,f} - A_{r,f} U_{L,f} (T_{r,f} - T_a) \quad (58)$$

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

En el anexo III se puede observar el script para determinar la eficiencia térmica del colector fresnel lineal.

Determinados todos los parámetros que se requieren, para desarrollar un análisis teórico de los dos sistemas de colectores solares, se puede llegar a obtener la eficiencia óptica, y de igual manera la eficiencia térmica.

Dado que se cuenta con las instalaciones de los campos solares, se complementa este trabajo realizando la comparación de las tecnologías de captación solar cilindro parabólico y fresnel lineal, de una manera experimental.

El hecho de desarrollar mediciones de campo, no solo nos permite realizar la comparación mencionada, sino que nos da la oportunidad, de acuerdo a las condiciones específicas de la zona y del fluido geotérmico, así como de las características particulares de los campos de colectores solares, de poder determinar y corregir algunos de los parámetros empíricos utilizados en este proyecto.

Realizando un procedimiento de manera inversa para determinar las condiciones anteriormente mencionadas.

Estos parámetros empíricos son una gran aportación de este trabajo, debido a que son valores prácticamente únicos, de acuerdo a las características de los concentradores, de la zona en la que se encuentren instalados y del fluido de trabajo.

Para el caso de resultados de manera experimental, se toma como base la ecuación 19, con la finalidad de poder calcular la eficiencia térmica ( $\eta$ ) de los colectores. El calor útil ( $Q_u$ ) es obtenido mediante la ecuación 41, el cual es generado entre la entrada y la salida de los colectores.

Algunos de los datos necesarios para el cálculo de la eficiencia térmica de manera experimental, son las temperaturas de entrada ( $T_i$ ) y salida ( $T_o$ ) de los colectores, obtenidas mediante el uso de termopares a la entrada y salida, almacenados mediante una tarjeta de adquisición de datos, el flujo de operación ( $\dot{m}$ ) en las líneas de colectores, que es obtenido mediante el uso de un medidor de flujo ultrasónico, la presión de operación determinada por manómetros colocados a la entrada de las líneas de los colectores, estos datos fueron recaudados directamente en campo.

Otros datos de igual manera importantes pero que fueron obtenidos mediante una estación meteorológica de la UMSNH, y validados con varias mediciones en campo con equipos como anemómetros, medidores de irradiación solar y termómetros, son la irradiación solar ( $I_b$ ), la velocidad del viento ( $V_a$ ), la temperatura ambiente ( $T_a$ ) y la presión atmosférica ( $P_a$ ).

A continuación se hace la descripción, de las actividades desarrolladas para poder llevar a cabo la experimentación en campo y obtener los datos mencionados anteriormente, para este caso en particular, determinar los parámetros empíricos y realizar la comparación entre los colectores cilindro parabólico y fresnel lineal.

---

---

## CAPITULO 4 EXPERIMENTACIÓN

---

---

### 4.1 DESCRIPCIÓN

Dado que el campo de los colectores parabólicos tiene la conexión de tubería para todo el campo solar y esta pasa por toda la planta de ciclo binario, fue necesario realizar una adecuación en las conexiones del campo, donde sólo se utilizaron las líneas que corresponden a la misma área de captación del campo de los colectores fresnel. El cálculo realizado inicialmente de las aproximaciones de área de captación efectiva, fue de utilizar 4 líneas de espejos parabólicos para utilizar toda el área de captación fresnel.

Es de mencionar que los campos de colectores solares fueron diseñados para operar con un fluido geotérmico de temperatura inicial mayor a 120 °C, utilizando todos los equipos de la planta. Pero para el desarrollo de este proyecto, donde una de las consideraciones importantes para realizar la comparación entre los dos tipos de tecnologías fue el utilizar, sino, la misma área de captación si una muy próxima entre ellas, se hizo el arreglo para una nueva instalación, donde nada más estuvieran en operación las líneas requeridas de los concentradores parabólicos y los módulos de los concentradores fresnel lineal.

Para tener un mejor control del fluido a utilizar en las pruebas, se decidió utilizar recurso geotérmico de baja entalpía, que podía ser obtenido de manantiales de la comunidad, encontrado a temperaturas muy próximas al ambiente. Como este flujo manejado en líneas de concentradores no sería muy grande, ni la temperatura muy alta, no era conveniente el utilizar la torre de enfriamiento instalada en la planta.

Dado esto para el enfriamiento del fluido que pasaría a través de los receptores de los concentradores se contó con el apoyo de una pequeña torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo, es de mencionar, que dicha torre fue diseñada y construida por alumnos de licenciatura de la Facultad de Ingeniería Mecánica, asesorados por el Dr. J. Jesús Pacheco Ibarra.

A la par, de este proyecto, los alumnos que diseñaron y construyeron la torre de enfriamiento pueden validar su prototipo con la realización de estas pruebas.

Se elaboró un diseño preliminar del arreglo general de cómo serían las conexiones para el funcionamiento y prueba de los colectores, con la finalidad de determinar cantidad de material requerido, para realizar la compra de él y poder ejecutar el montaje. En la Figura 39 se muestra el diseño elaborado, para la adecuación de los campos de colectores parabólicos para las pruebas.

El funcionamiento, será en un circuito cerrado, donde una motobomba succionará el fluido almacenado en un tinaco de agua, haciendo circular por los campos de colectores cilindro parabólicos y fresnel lineal, controlando el flujo del fluido con una tubería de recirculación al tinaco de agua a la descarga de la bomba, el fluido a la descarga de los campos solares pasa directamente a la torre de enfriamiento, esta a su vez el agua enfriada, regresa al tinaco de agua, realizando así el circuito cerrado.

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

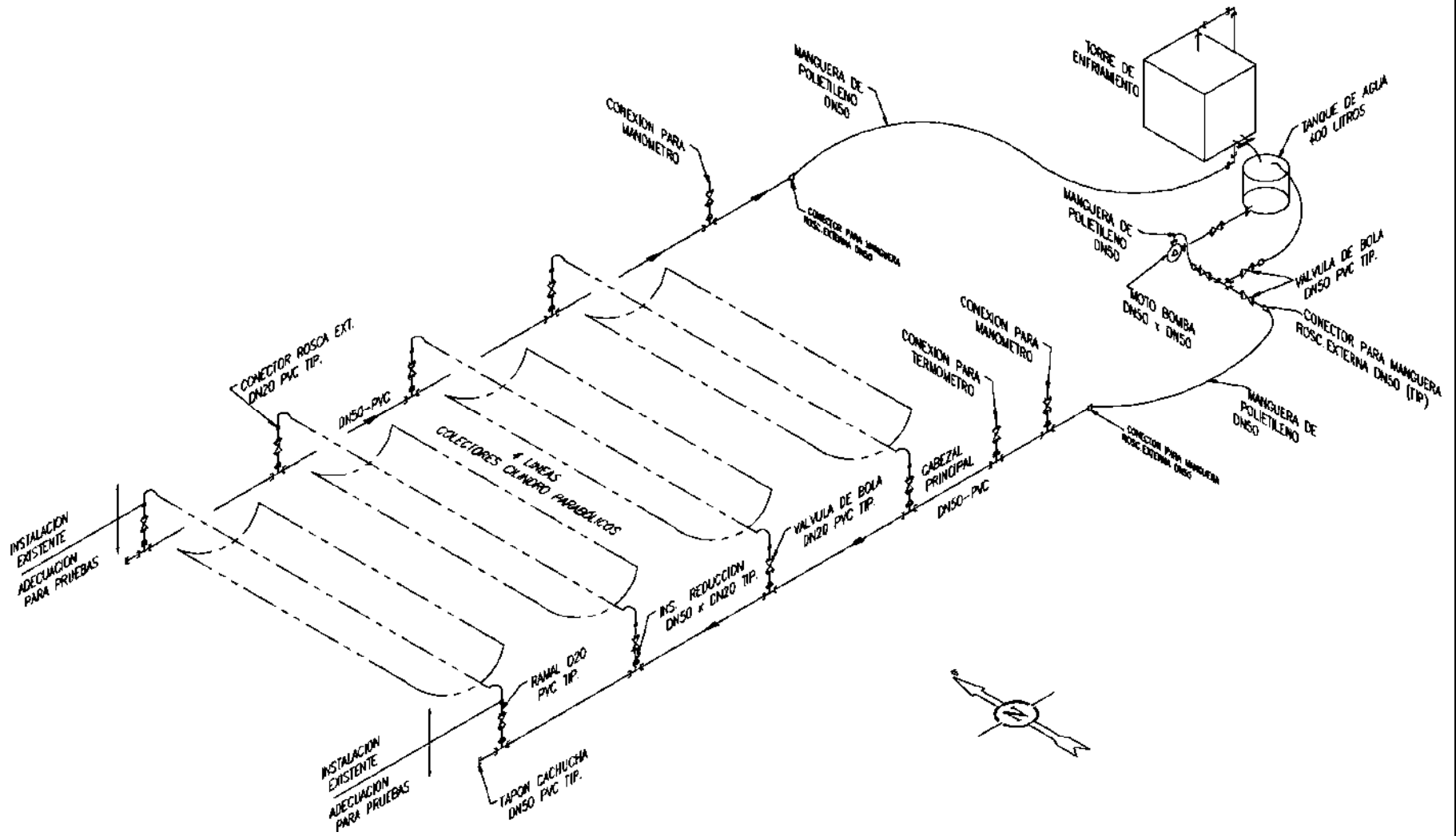


Figura 38. Isométrico para conexiones de pruebas

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Debido a las condiciones actuales de operación donde el fluido geotérmico tiene una temperatura ambiente, fue posible la adquisición de materiales (PVC, manguera de polietileno, válvulas de PVC, etc), de manera accesible y aun precio considerablemente bajo, que nos permita llevar a cabo la experimentación con las adecuaciones requeridas de los campos solares.

### 4.2 PROCEDIMIENTO DE MONTAJE

De la Figura 39 a la Figura 46, se muestra varias de las conexiones de PCV realizadas para la adecuación de las pruebas en el campo de colectores solares parabólicos, entre ellos el cabezal de entrada a los colectores parabólicos, las T para las derivaciones a las líneas de los colectores, las conexiones para los instrumentos a la entrada y salida, el cabezal de descarga del campo solar y las conexiones para manguera de polietileno.

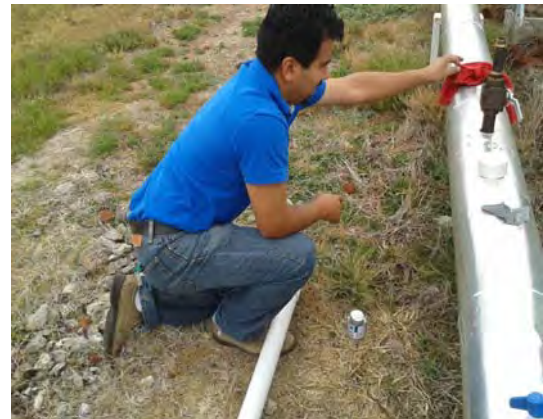


Figura 39. Conexión de la tubería a la entrada de los colectores parabólicos



Figura 40. Conexión de T para derivación a la línea de colectores parabólicos



**COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**



**Figura 41. Conexión de reducciones para derivación a la línea de colectores parabólicos**



**Figura 42. Conexión de accesorios al final del cabezal de entrada**



**Figura 43. Conexión de válvula de corte a una línea de colectores parabólicos**

**COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**



**Figura 44. Conexión para manguera a la entrada y salida de los colectores parabólicos**



**Figura 45. Conexión del ramal a la entrada y salida de los colectores parabólicos**



**Figura 46. Cabezal de entrada a los colectores parabólicos**

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA



**Figura 47. Cabezal de salida los colectores parabólicos**

Para el caso del campo de colectores fresnel lineal, no se desarrolló en sí, un diseño para la determinación de materiales, dado que es una sola entrada y una sola salida de los receptores, por lo tanto solo fue requerida la adquisición de unos accesorios para poder acoplar el campo de colectores a la torre de enfriamiento y a la bomba de circulación.

En las figuras de la 48 a la 49 se muestran las conexiones de PVC realizadas para adecuar el campo de colectores fresnel con la bomba de circulación y la torre de enfriamiento.



**Figura 48. Conexión a la entrada de colectores fresnel**

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA



Figura 49. Conexiones a la salida de los colectores fresnel

Para realizar las pruebas, hubo conexiones comunes para los dos campos de colectores, entre ellas, la torre de enfriamiento, el tanque para agua, la bomba y el bypass para la recirculación al tanque para agua, así como un moto generador que era el encargado de suministrar la energía eléctrica para el funcionamiento de los campos solares, del ventilador de la torre y la tarjeta de adquisición de datos.

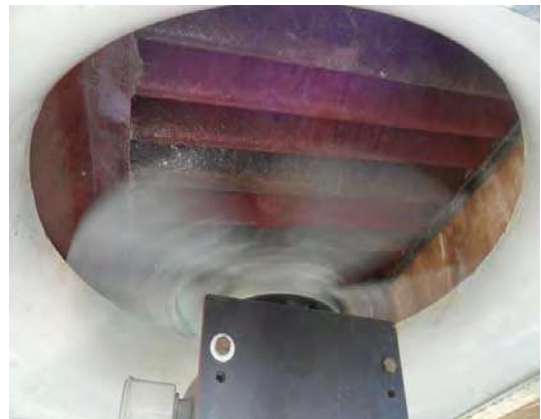
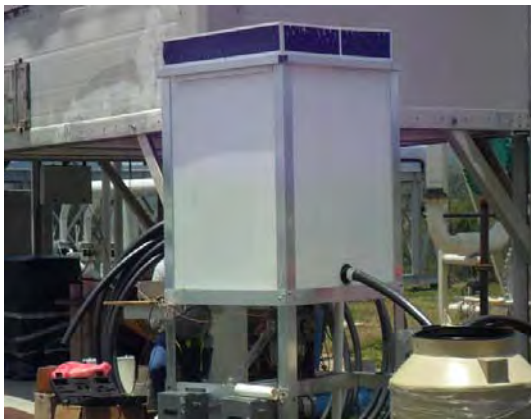


Figura 50. Torre de enfriamiento y ventilador

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA



**Figura 51. Conexiones comunes, bomba, tanque para agua y recirculación**

En la Figura 52, se puede observar el equipo encargado del control de rastreo solar de los colectores, para el caso de los colectores parabólicos, el módulo de control electrónico consta de dos motores, tiene un eje de movimiento para dos filas, accionadas cada una de ellas por un motor, y solo se tiene la capacidad de movimiento de una fila a la vez y para el caso de los fresnel el módulo de control consta de dos motores, donde uno acciona 4 módulos del campo y el otro motor acciona 5 módulos.



**Figura 52. Control para el movimiento de los colectores solares**

Una vez instaladas las conexiones se procedió a poner en funcionamiento todos los equipos y a la toma de muestras, prácticamente al inicio de las pruebas, se tuvo el problema de dos líneas de colectores parabólicos, donde una línea llegó a su posición adecuada, pero mientras avanzaba el tiempo, la línea de colectores ya no realizó ningún movimiento de seguimiento al sol, y otra línea no detectó la posición del sol y su movimiento era de extremo a extremo.

Teniendo este inconveniente con dos líneas fue requerido nuevamente el cálculo de semejanza de las áreas entre los colectores, ahora se utilizarán solamente dos líneas de colectores parabólicos, lo que representa un área aproximada de 4 módulos de colectores fresnel.

Una vez determinada el área, solo se aislaron dos líneas de colectores parabólicos con las válvulas de corte instaladas en los ramales y sólo se puso en funcionamiento una caja con dos motores y para el caso de los colectores fresnel, sólo se puso en funcionamiento un motor de la caja de control que acciona 4 módulos del campo.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Se instaló un medidor de flujo después de la recirculación a la entrada de los colectores, para poder medir y controlar el flujo que circula por los campos y poder realizar varias mediciones al estar modificando el flujo de entrada.

En la Figura 53, se pueden observar las conexiones realizadas para la instalación del medidor del flujo para las líneas de colectores parabólicos, así como el equipo de medición de flujo.



**Figura 53. Conexiones del medidor de flujo en líneas de colectores parabólicos**

En la Figura 54, se observa la conexión del medidor de flujo ahora para el campo de colectores lineales fresnel, utilizando el mismo equipo de medición.



**Figura 54. Conexiones del medidor de flujo en línea del colector fresnel**

Dado que el área de captación fue reducida, el flujo inicial de diseño para los campos solares ya no era el mismo, dado esto se realizaron varias pruebas con diferentes flujos, para ir observando el comportamiento de las líneas de los campos solares. Las pruebas realizadas fueron de acuerdo a la norma ASHRAE 93-1986, donde se indica que deben ser realizadas por un periodo de tiempo constante o durante 5 min [31]. Con la finalidad de obtener resultados factibles se realizaron pruebas en periodos de 5 min.

De manera inicial las pruebas fueron realizadas en el campo de colectores parabólicos, obteniendo los siguientes resultados en ellas.

# COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

## 4.3 PRUEBAS

El primer flujo utilizado fue de  $0.0018 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $1.8 \text{ l/s}$ ), fue el flujo máximo de la bomba, como lo muestra la Figura 55, además se muestra la presión manométrica para ese flujo.



Figura 55. Flujo máximo en pruebas,  $0.0018 \text{ m}^3/\text{s}$

Con estas condiciones de flujo y presión a la entrada de las líneas de colectores cilindro parabólicos, se obtuvieron las siguientes temperaturas de entrada y de salida, para el tiempo determinado de medición.

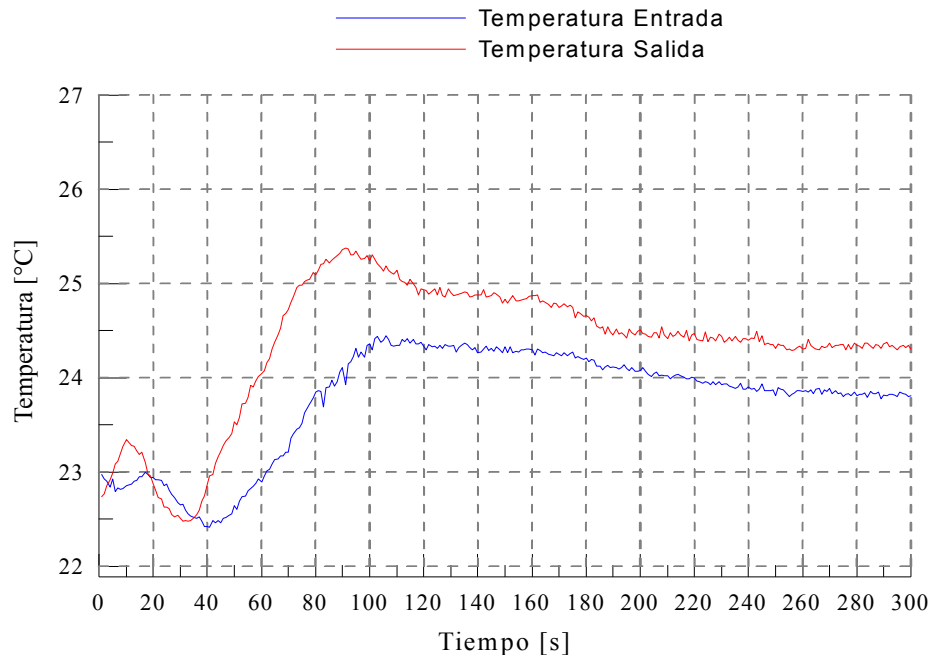


Figura 56. Gradiente de temperatura a  $0.0018 \text{ m}^3/\text{s}$  en colectores parabólicos

En la gráfica de la Figura 56, se puede observar al principio de la medición una inestabilidad, debido al agua almacenada en los tubos receptores, y al tiempo de estabilización del ventilador de la torre de enfriamiento, una vez estabilizado, se puede apreciar un gradiente de temperatura de aproximadamente de  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo que indica que es demasiado el flujo que circula por los tubos receptores y el tiempo de

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

residencia del fluido dentro del tubo es poco, lo que no permite un gran intercambio de calor entre el tubo receptor y el fluido.

El segundo flujo que se utilizó fue el flujo menor, de  $0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.2 \text{ l/s}$ ), como lo muestra la Figura 57.



Figura 57. Flujo mínimo de pruebas,  $0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$

Con estas condiciones de flujo y presión a la entrada de las líneas de colectores cilindro parabólicos, se obtuvieron las siguientes temperaturas de entrada y de salida.

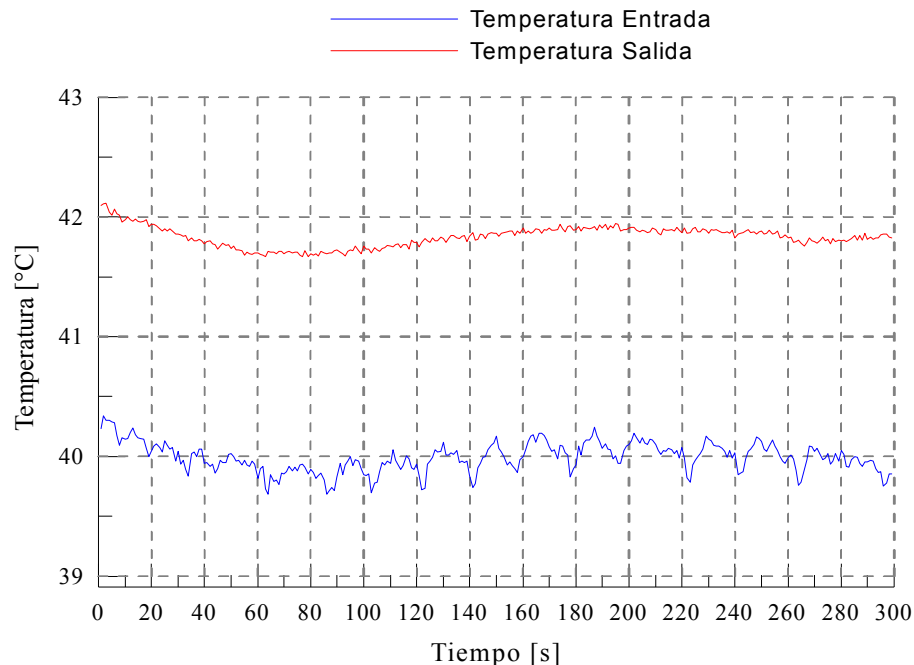


Figura 58. Gradiente de temperatura a  $0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$  en colectores parabólicos

Con este flujo, como se puede observar en la gráfica de la Figura 58, es posible checar un aumento de temperatura a la descarga de los colectores, pero el gradiente de temperatura fue también de aproximadamente  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ , ya que la temperatura de entrada también tenía una temperatura mayor y se



## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

mantuvo de manera prácticamente constante la temperatura tanto de entrada como de salida, además es de mencionar que con este flujo, dado el arreglo en serie de los colectores, no se tiene una distribución uniforme del flujo en las líneas, el flujo es muy poco para la segunda línea y la presión es poca para poderlo distribuir de una manera que tengan el mismo flujo las dos. Como consecuencia de esto, la descarga de la segunda línea, elevó la temperatura en gran cantidad, ya que el fluido estaba en un estado estacionario, generando una deformación en la tubería instalada como lo muestra la Figura 59, ya que la otra línea mantenía una temperatura mucho menor.



**Figura 59. Deformación de las conexiones de descarga de la segunda línea de los colectores parabólicos**

Se realizaron las correcciones necesarias, para seguir realizando las pruebas experimentales, la tercera prueba, ahora con un flujo medio para las líneas de colectores parabólicos.

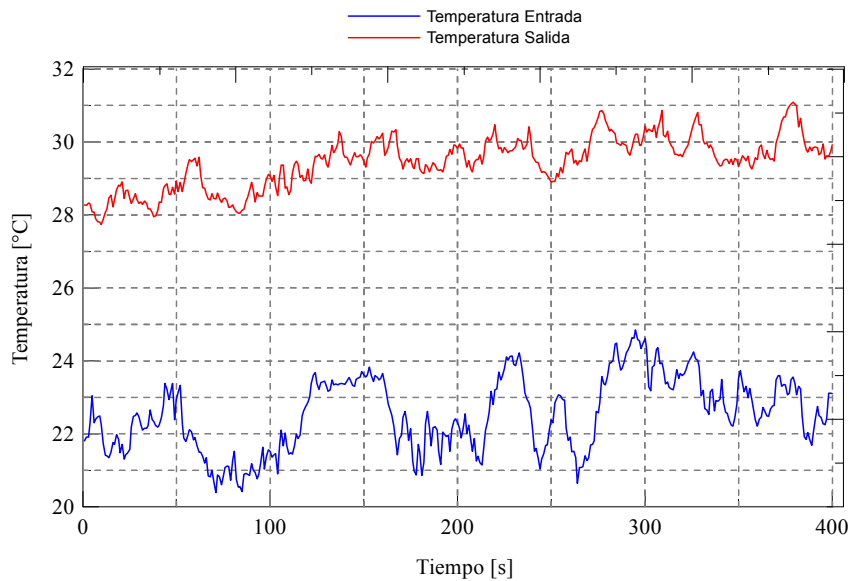
El tercer flujo, de prueba fue de  $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.9 \text{ l/s}$ ).



**Figura 60. Flujo medio de prueba,  $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$**

Con estas condiciones de operación se tomaron las mediciones durante un periodo de aproximadamente 7 minutos, en la Figura 62, se puede observar los resultados obtenidos.

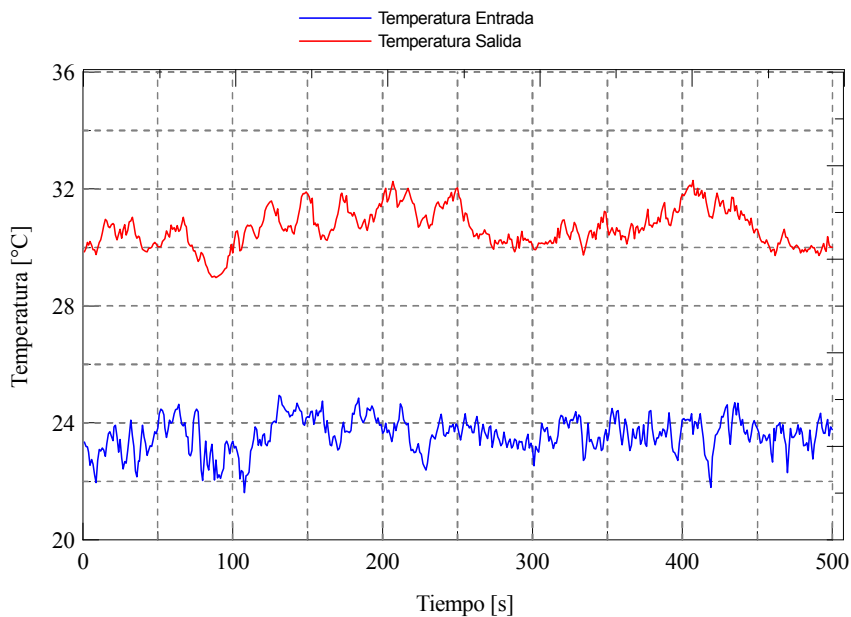
## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA



**Figura 61. Gradiente de temperatura a  $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$  en colectores parabólicos**

Con estas nuevas condiciones de operación, se logró un mayor gradiente de temperatura entre la entrada y las salidas de los colectores de aproximadamente de  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ , que fue uno de los mayores valores registrados hasta ese momento, además de tener un buen comportamiento en todas las conexiones del sistema.

Para corroborar que este había sido el mayor gradiente obtenido, se realizaron más mediciones a lo largo del día con diferentes tiempos de prueba, pero mismo flujo de  $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$ , variando el tiempo de medición a 8:30 min. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas de la Figura 63 a la Figura 65.



**Figura 62. 2do gradiente de temperatura a  $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$**

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

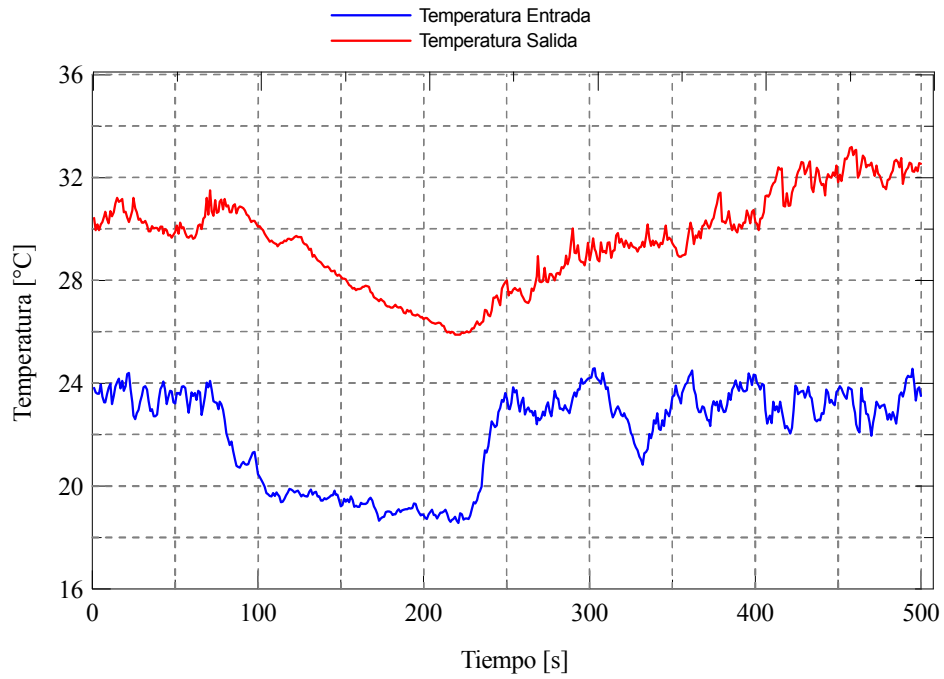


Figura 63. 3er gradiente de temperatura a  $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$

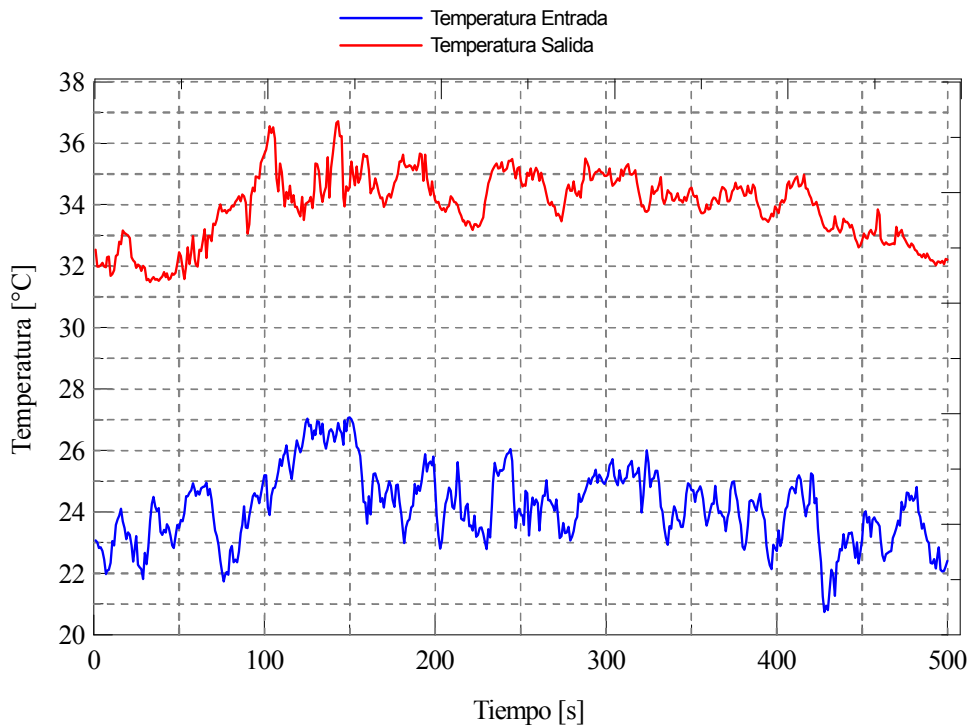


Figura 64. 4to gradiente de temperatura a  $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Con este flujo, de acuerdo a los resultados anteriores, se obtuvieron gradientes de temperatura desde los 8 °C hasta los 10 °C en el campo de concentradores, así mismo la torre de enfriamiento tuvo un similar gradiente de temperatura, con una pérdida de flujo muy pequeña, lo que nos indicó buenas condiciones de operación para las pruebas.

Para el caso de los colectores fresnel se realizó una prueba en ellos con un flujo menor con la finalidad de observar su comportamiento, se hizo circular un flujo de 0.0002 m<sup>3</sup>/s.



Figura 65. Flujo mínimo de prueba 0.0002 m<sup>3</sup>/s en colectores Fresnel

Con este flujo de prueba, se obtuvieron los resultados mostrados en la gráfica de la Figura 67.

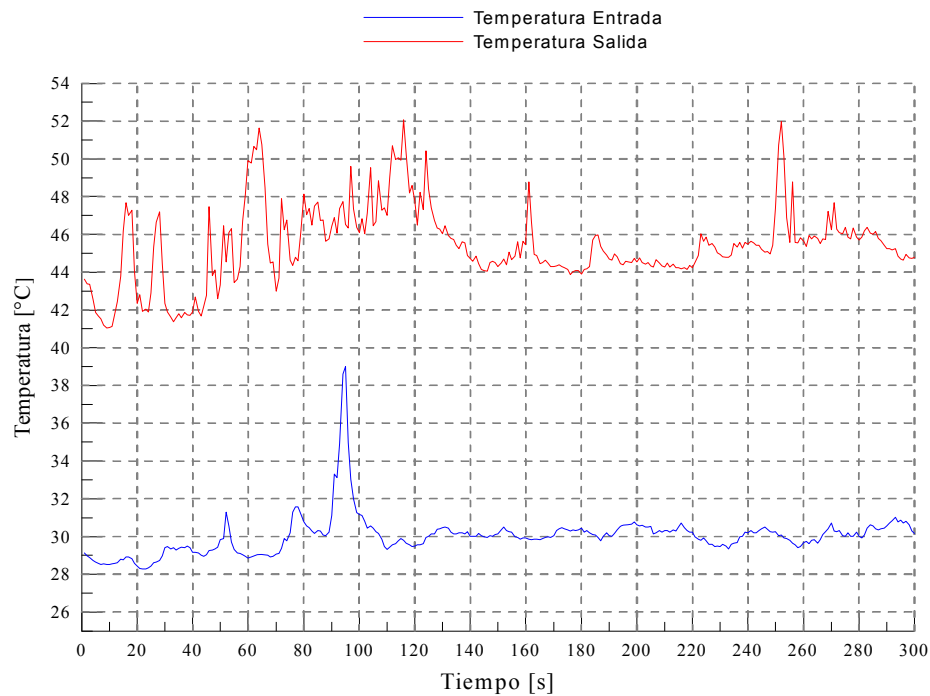


Figura 66. Gradiente de temperatura con flujo de 0.0002 m<sup>3</sup>/s, en colectores fresnel

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Con este flujo, se obtuvo un gradiente de temperatura que variaba alrededor de los 12 °C hasta los 16 °C, y con un buen comportamiento en las conexiones del arreglo montado para las pruebas en los colectores fresnel, lo que indica que la distribución del flujo es mucho mejor que en los concentradores parabólicos, dando un mejor intercambio de calor entre los tubos receptores y el fluido.

Este flujo sería adecuado, para obtener la mayor temperatura posible en los colectores, pero en el campo de colectores parabólicos no tenía una distribución uniforme, y se presentarían los problemas en las deformaciones de las conexiones, además de que la torre de enfriamiento no estaba diseñada para reducir un alto gradiente de temperatura, lo que nos generaría que poco a poco fuera aumentando la temperatura en el tanque de agua, y esto llegaría a dañar la bomba utilizada en las pruebas.

Para el desarrollo de una comparación entre los dos colectores solares, es necesario tener las mismas condiciones de operación, es decir, la misma área efectiva de captación, el mismo flujo de agua geotérmica y las mismas condiciones atmosféricas.

Además de los datos de temperaturas obtenidos en las pruebas anteriores para los campos, en las figuras siguientes se pueden observar imágenes de los campos solares en funcionamiento, donde la irradiación es reflejada por los captadores y donde puede observarse la recepción por los tubos receptores, las primeras imágenes son para las líneas de colectores cilindro parabólicos.

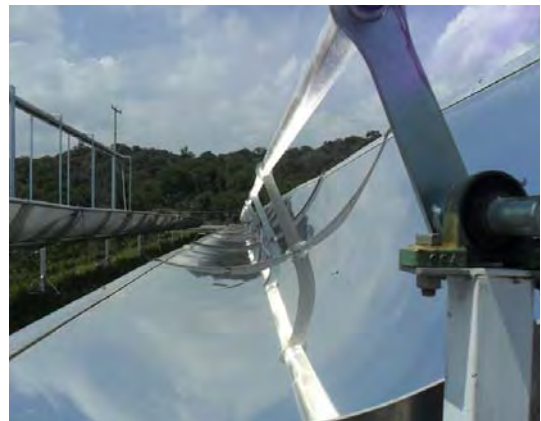


Figura 67. Colectores parabólicos en funcionamiento I

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

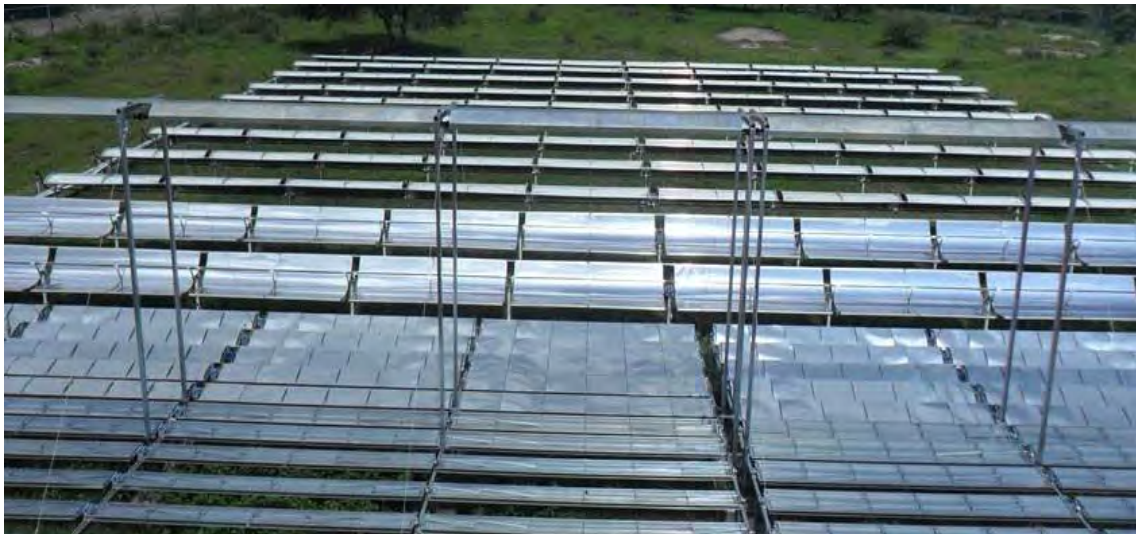
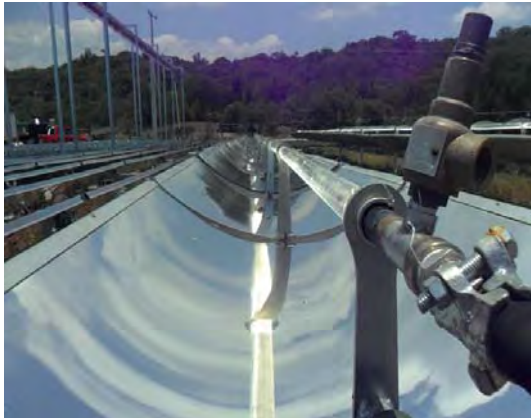


Figura 68. Colectores parabólicos en funcionamiento II

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Las siguientes figuras son para los módulos del campo de colectores fresnel, puestos en funcionamiento en las pruebas.

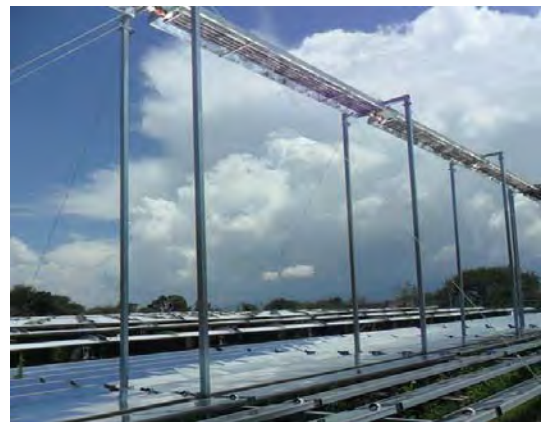
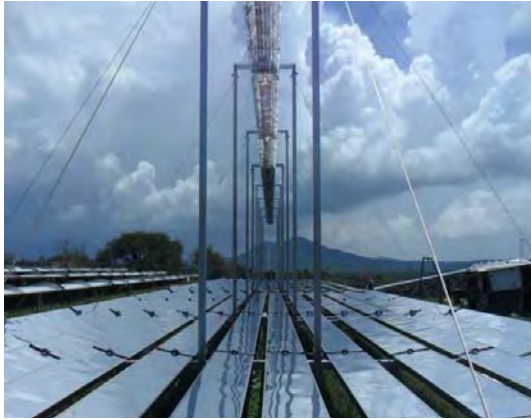


Figura 69. Colectores fresnel en funcionamiento

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Cabe mencionar que durante las pruebas de los campos, se contó con el apoyo de una cámara termográfica para analizar la distribución de temperaturas en las diferentes tecnologías, estas imágenes también son mostradas a continuación.

Primeramente se muestran algunas de las imágenes de la cámara para las líneas de los colectores y receptores de los concentradores parabólicos.

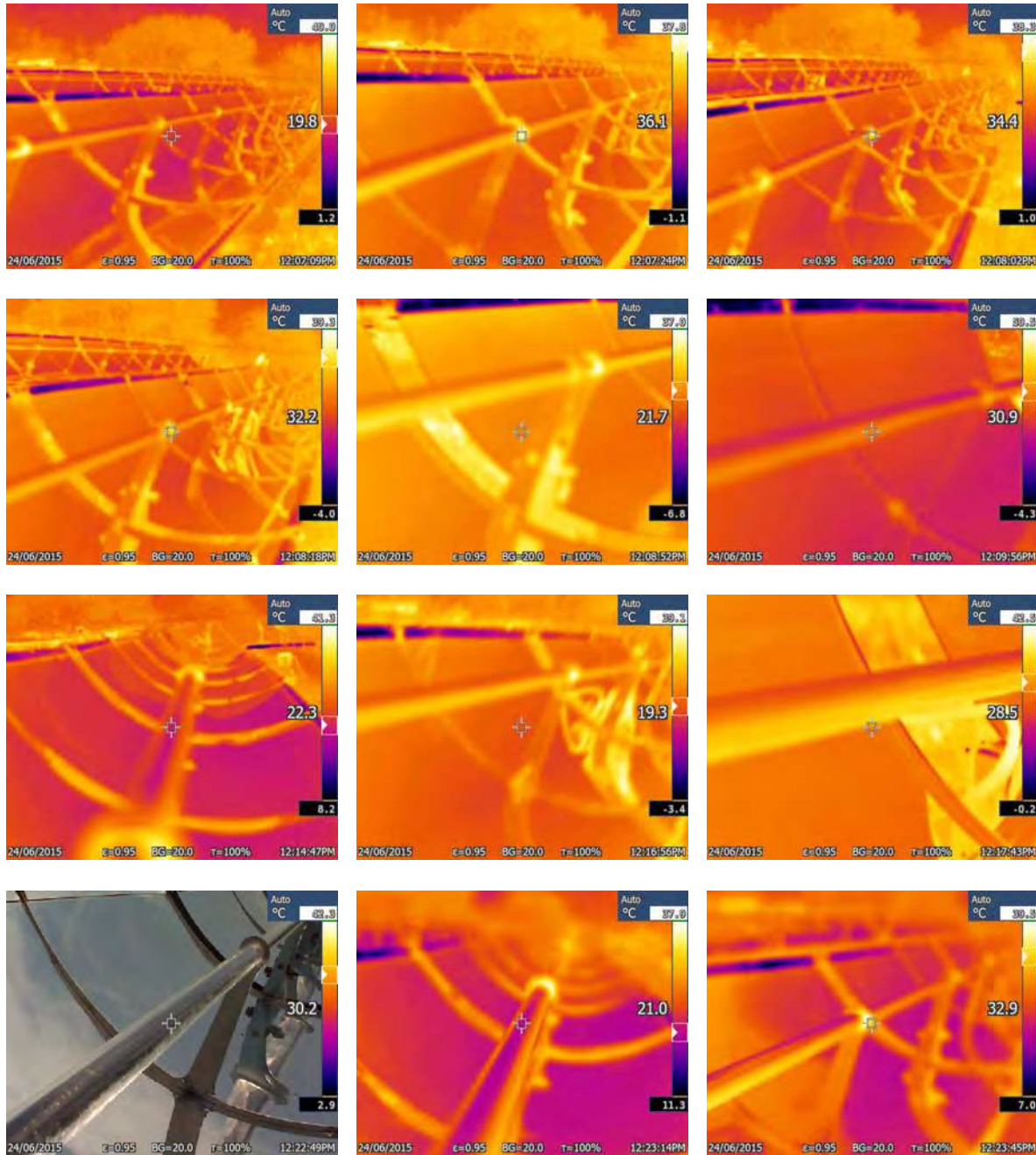


Figura 70. Imágenes de cámara termográfica en concentradores cilindro parabólicos



## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

A continuación se presentan algunas de las imágenes tomadas durante el funcionamiento de los concentradores fresnel lineal.

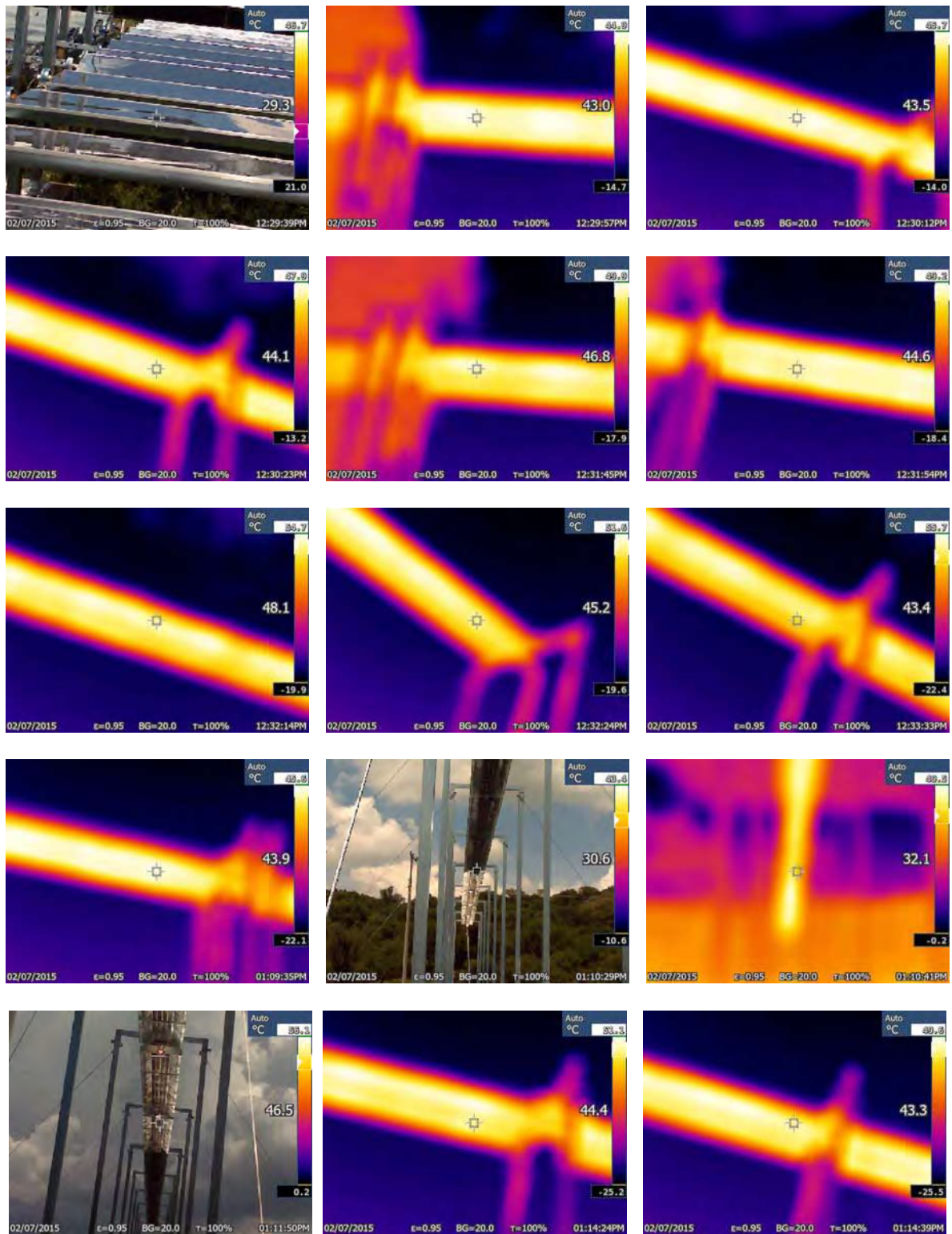


Figura 71. Imágenes de cámara termográfica en concentradores fresnel lineal

## CAPITULO 5 RESULTADOS

### 5.1 TÉCNICOS

Los resultados obtenidos de la comparación técnica de los dos concentradores solares, son descritos en este capítulo. Se realizaron varios días de pruebas en el campo de Simirao, con el propósito de mostrar los resultados obtenidos, se consideraron dos días de ellos, en los cuales se efectuaron todas las mediciones requeridas, estas pruebas fueron de acuerdo a la norma ASHRAE 93-1986, donde de los días considerados se muestra solamente una prueba de cada día, para un día con la mayor irradiación medida durante las pruebas, y para el otro, con la menor irradiación medida, esto con el fin de explicar y observar las diferencias entre los resultados de manera teórica y experimental.

El primer día seleccionado fue el 24 de junio del año 2015, que corresponde al día 175 del año. Para el caso de la eficiencia óptica de ambos colectores, en la Figura 72 se muestra el resultado de la eficiencia óptica para ese día de los dos colectores, con el apoyo del script desarrollado en el anexo I, durante las horas efectivas de sol, que son de las 6 a las 18 horas.

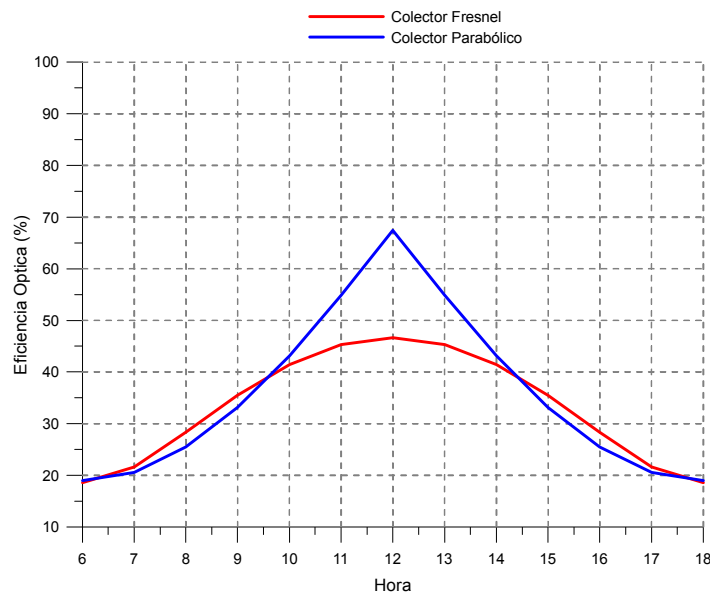


Figura 72. Eficiencia óptica de los colectores solares

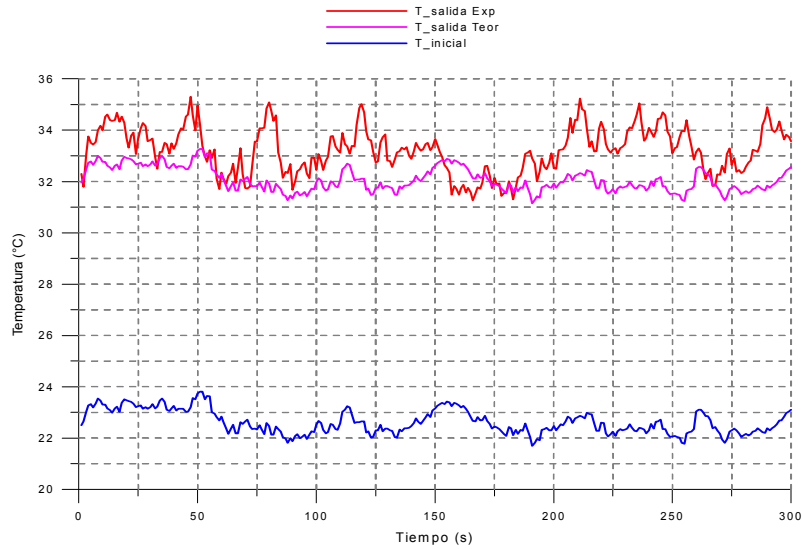
La prueba fue desarrollada a las 13:50 hrs, los datos para los cálculos tanto teóricos como experimentales para esa hora de la prueba, son los siguientes:

Irradiación solar ( $I_b = 867 \frac{W}{m^2}$ ), temperatura ambiente ( $T_a = 23.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), presión atmosférica ( $P_a = 1.01231 \text{ bar}$ ), velocidad del viento ( $V_a = 2.17 \text{ m/s}$ ), presión manométrica ( $P_i = 0.7822 \text{ bar}$ ), flujo volumétrico ( $\dot{m}_v = 0.0009 \frac{m^3}{s}$ ).

Los resultados obtenidos son mostrados a continuación por medio de gráficas hechas para la duración de la prueba.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

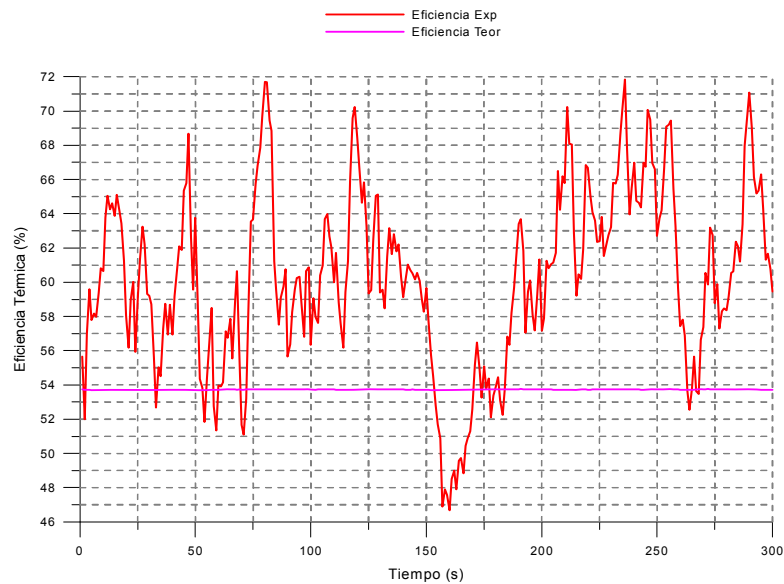
En la gráfica de la Figura 73, se muestra la temperatura de salida para el colector cilindro parabólico, de manera teórica y de manera experimental.



**Figura 73. Temperatura de salida colectores parabólicos, 24 junio 2015**

La Figura 73, nos muestra a las condiciones atmosféricas mencionadas de este día, una mayor temperatura de manera experimental, donde la temperatura teórica se comporta de una manera más estable de acuerdo con la temperatura de entrada. La variación de la temperatura experimental, se deben a factores como operación de la bomba, condiciones atmosféricas, funcionamiento de los colectores.

En la Figura 74, se presenta la eficiencia térmica obtenida de manera teórica y de manera experimental para el colector cilindro parabólico.

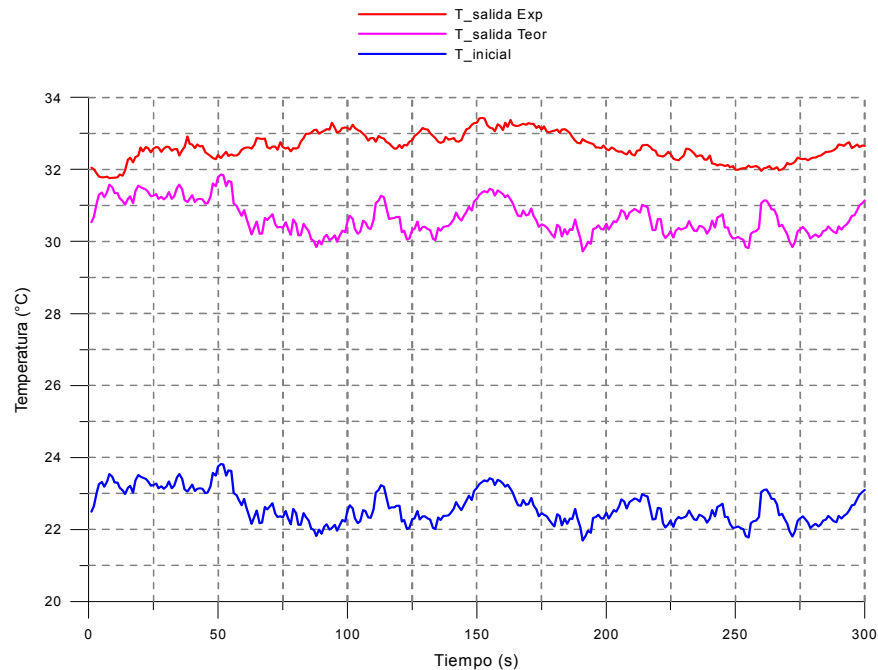


**Figura 74. Eficiencia térmica colectores parabólicos, 24 junio 2015**

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Para el caso de la gráfica de la Figura 74, la mayor parte de la prueba la eficiencia experimental fue mayor, la eficiencia teórica se comportó de una manera mucho más constante, no impacta de gran manera la variación que se tiene de la temperatura teórica a la salida, mostrada en la Figura 72, mientras que para el caso de la eficiencia experimental, una pequeña variación en la temperatura de salida experimental, tiene una gran influencia, ya que hace muy fluctuante a esta.

La gráfica mostrada en la Figura 75, muestra la temperatura de salida teórica y experimental para el caso de los colectores fresnel lineal.

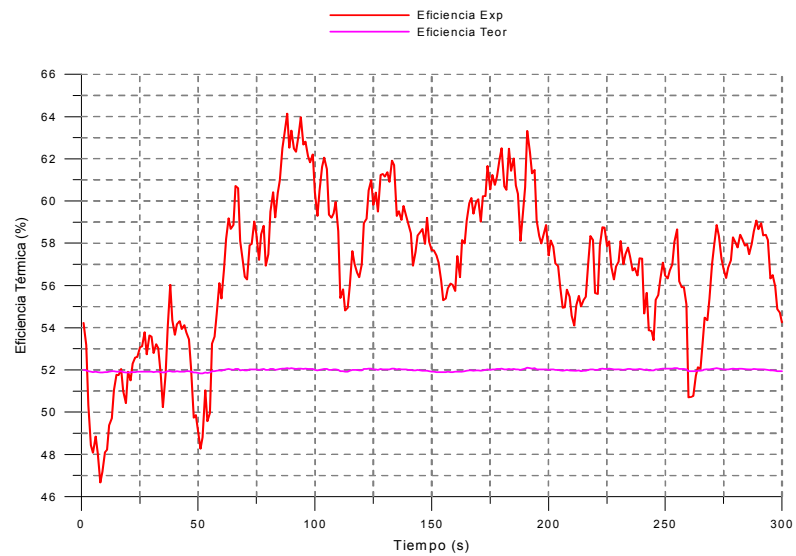


**Figura 75. Temperatura de salida colector fresnel lineal, 24 junio 2015**

Las temperaturas de salida para el colector fresnel, como lo muestra la Figura 75, se desarrollan de una manera más constante, tanto la teórica como la experimental, donde se obtuvo una temperatura a la salida mayor para el caso experimental.

Las eficiencias térmicas teórica y experimental son mostradas en la gráfica 76.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

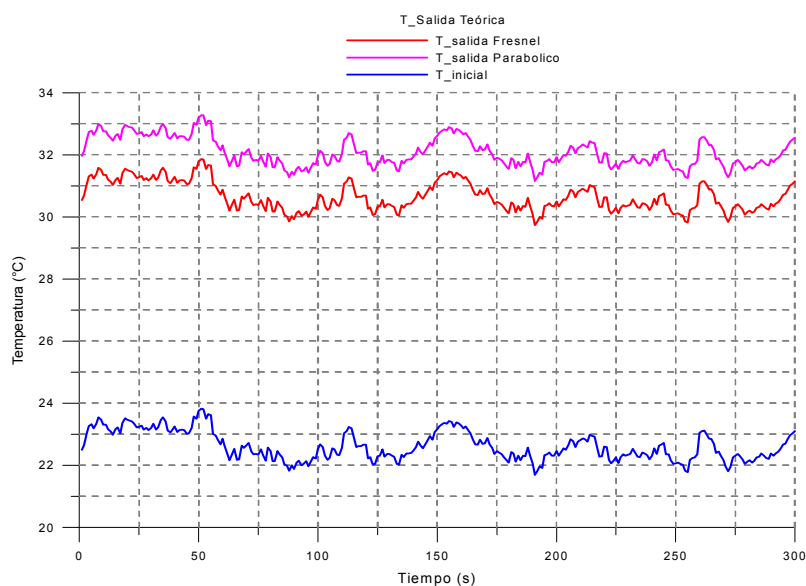


**Figura 76. Eficiencia térmica colector fresnel lineal, 24 junio 2015**

Para el caso de las eficiencias térmicas de manera teórica y experimental, se tiene en la mayor parte de la prueba una eficiencia mayor en el caso experimental, pero esta varía mucho, debido a la variación que se tiene en la temperatura de salida experimental, donde un pequeño aumento o reducción de la temperatura (de 1 °C o menor) representa grandes picos en la eficiencia térmica obtenida de manera experimental.

De las gráficas anteriores, es posible comparar la temperatura de salida de manera teórica y experimental entre los dos colectores en el caso de estudio.

Primero se muestra en la Figura de la gráfica siguiente la temperatura teórica para cada uno de los colectores.

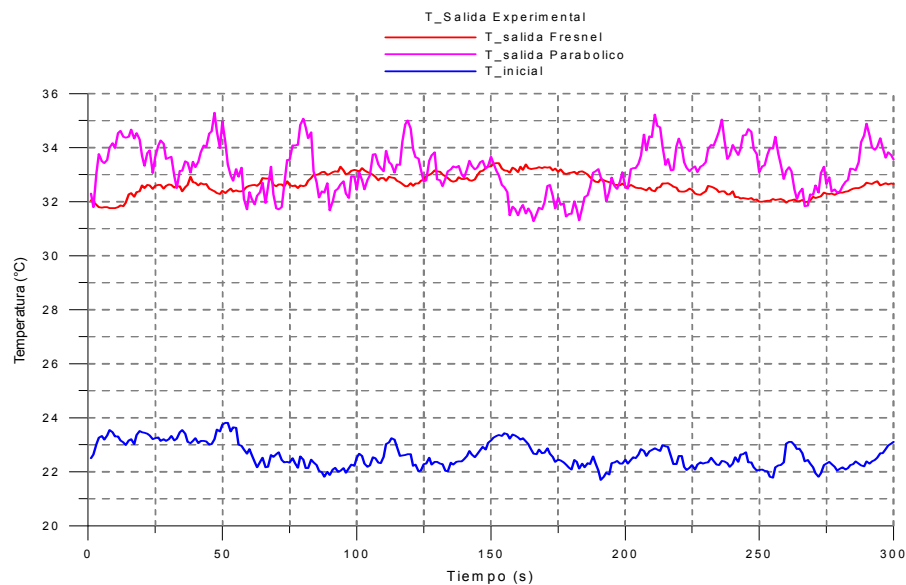


**Figura 77. Temperaturas teóricas de salida, 24 junio 2015**

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

En la gráfica de la Figura 77, se tiene la primera comparación entre los dos colectores, donde de manera teórica se tiene una mayor temperatura de salida en los colectores parabólicos, con un valor de aproximadamente 2 °C de diferencia entre ellas, a lo largo del tiempo de prueba las temperaturas se mantuvieron en una variación muy pequeña, prácticamente de manera constante.

A continuación, en la Figura 78, se muestra las temperaturas de salida para los colectores pero obtenida de manera experimental.

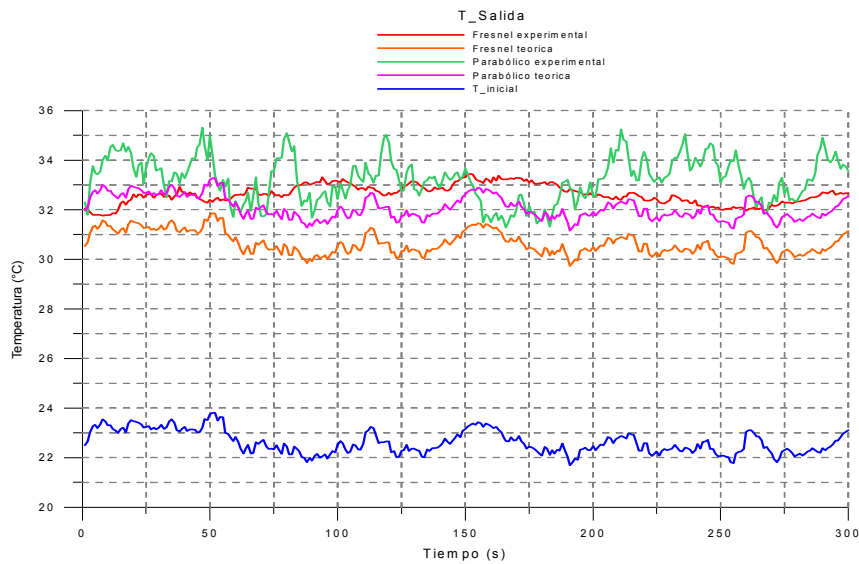


**Figura 78. Temperaturas experimentales de salida, 24 de junio 2015**

La siguiente comparación realizada entre los dos colectores es con la temperatura de salida obtenida de manera experimental, donde en la mayor parte de la prueba se obtuvo una mayor temperatura en el colector parabólico, a pesar de que para este colector las variaciones eran más fluctuantes, no se mantenían de manera constante dentro de un rango, lo que en algunos puntos, se ve una mejor temperatura de salida para los colectores fresnel.

En la gráfica de la Figura 79, se muestran las temperaturas de salida, tanto teóricas como experimentales para ambos colectores.

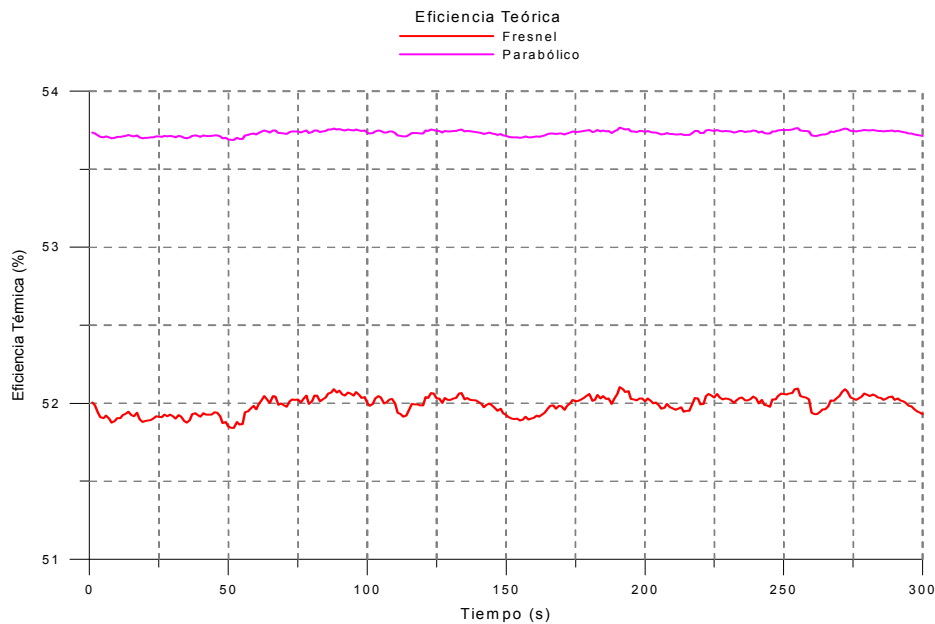
## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA



**Figura 79. Temperaturas de salida teóricas y experimentales, 24 junio 2015**

Agrupando en una sola gráfica los valores de las temperaturas de salida para los dos colectores, tanto de manera teórica, como de manera experimental, se puede observar que las temperaturas experimentales son mayores que las temperaturas teóricas para ambos casos, donde para el caso de las líneas de colectores parabólicos, tiene una mayor fluctuación, teniendo una variación hasta de 3 °C, durante la prueba, aun así, la temperatura mayor registrada fue para el caso de los colectores parabólicos.

La comparación de la eficiencia térmica entre ambos colectores también fue desarrollada de la misma manera, en la Figura 80 se muestra mediante gráfica los valores obtenidos, y en la tabla 11 se pueden observar algunos valores mostrados en la gráfica.



**Figura 80. Eficiencia térmica teórica, 24 junio 2015**

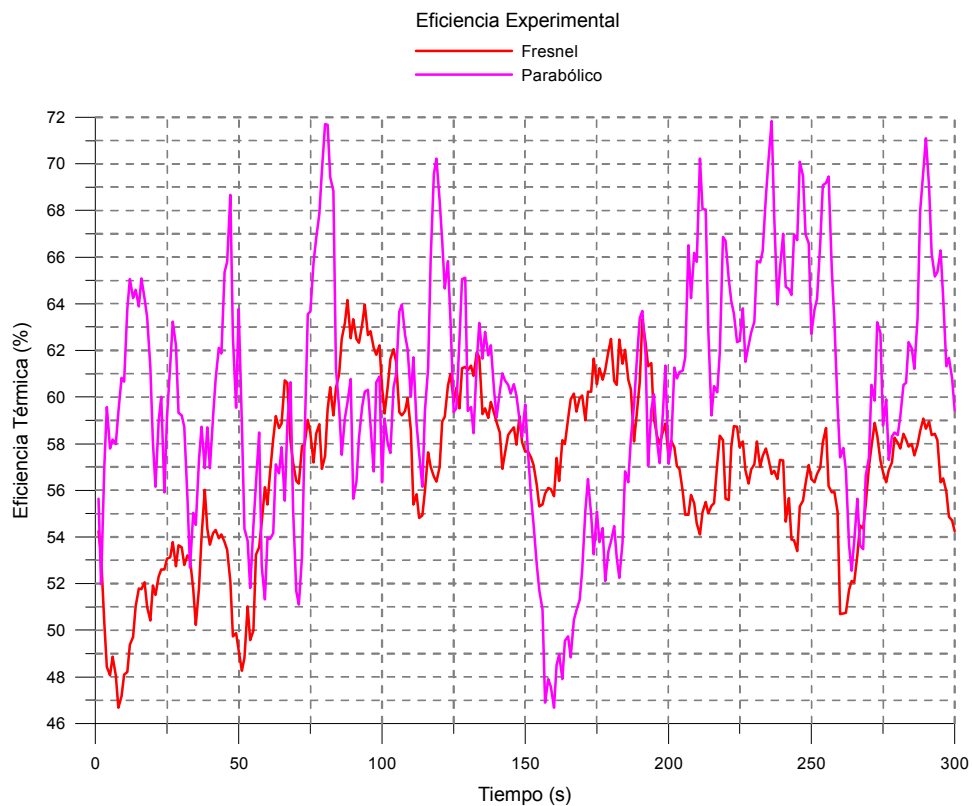
**COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**

**Tabla 11. Comparación eficiencia térmica teórica entre ambos colectores**

Tiempo (s)	Eficiencia Térmica (%)	
	Parabólico	Fresnel
1	53.735	52.005
50	53.69	51.85
100	53.735	52.003
150	53.712	51.924
200	53.737	52.01
250	53.751	52.059
300	53.714	51.93

En la Figura 81, se puede observar la siguiente comparación entre los dos tipos de colectores, la eficiencia térmica de manera teórica, donde se muestra un mejor rendimiento para el caso del colector cilindro parabólico, donde ronda cerca del 2 % mayor que la del colector lineal fresnel.

A continuación se muestra la eficiencia térmica obtenida de manera experimental, y en la tabla 12 se muestran algunos valores representados en la gráfica 81.



**Figura 81. Eficiencia térmica experimental, 24 junio 2015**



**COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**

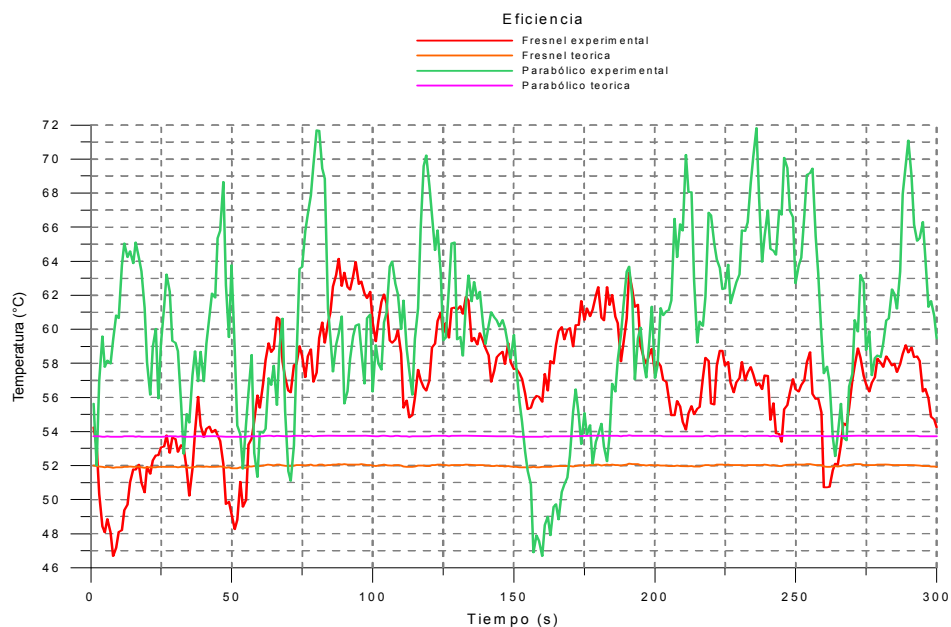
**Tabla 12. Comparación eficiencia térmica experimental entre ambos colectores**

Tiempo (s)	Eficiencia Térmica (%)	
	Parabólico	Fresnel
1	55.644	54.236
50	63.767	49.150
100	56.344	60.406
150	59.680	57.668
200	57.148	57.416
250	62.712	56.472
300	59.444	54.241

Como ya se ha mencionado, la variación que se tiene en la temperatura obtenida de manera experimental, representa en la eficiencia térmica grandes picos, generando una variación fuerte en ella, por ejemplo, una variación de 3 °C, incrementaría o disminuiría la eficiencia térmica experimental hasta diferencias de 15 valores porcentuales.

En la Figura 81, se mostró otra comparación realizada entre los dos colectores, que aunque de manera muy fluctuante, en la mayor parte de la prueba es mejor la eficiencia del colector parabólico. Aunque en una parte de ella, la eficiencia térmica del colector fresnel es mejor, lo que indica que se tiene una mayor variación de la eficiencia, debido al comportamiento que tiene el colector parabólico en funcionamiento.

En la Figura 82, se muestran las eficiencias térmicas para ambos colectores de manera experimental y de manera teórica.



**Figura 82. Eficiencia térmicas teóricas y experimentales, 24 junio 2015**

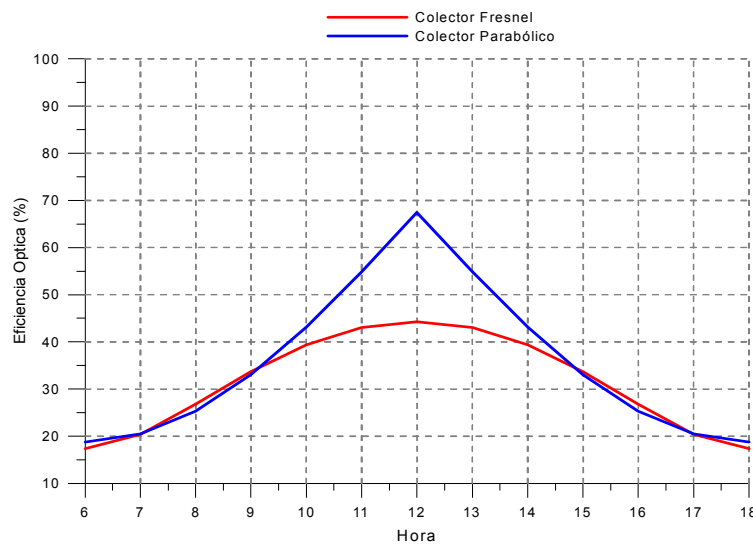
**COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**

**Tabla 13. Comparación eficiencia térmica teórica y experimental entre ambos colectores**

Tiempo (s)	Eficiencia Térmica (%), teórica		Eficiencia Térmica (%) Experimental	
	Parabólico	Fresnel	Parabólico	Fresnel
1	53.735	52.005	55.644	54.236
50	53.69	51.85	63.767	49.150
100	53.735	52.003	56.344	60.406
150	53.712	51.924	59.680	57.668
200	53.737	52.01	57.148	57.416
250	53.751	52.059	62.712	56.472
300	53.714	51.93	59.444	54.241

En la Figura 82, conjuntando todas las eficiencias térmicas, es decir, las eficiencias teóricas y térmicas para los dos colectores, podemos apreciar que las eficiencias térmicas, prácticamente siguen un patrón de manera constante, donde su variación debido al gradiente de temperatura es relativamente poco, en cambio para los valores experimentales, se tienen grandes variaciones. Esta gráfica además nos permite saber, que la eficiencia más alta obtenida fue para el colector cilindro parabólico.

El segundo día seleccionado fue el 02 de julio del año 2015, que corresponde al día 183 del año. Para el caso de la eficiencia óptica de ambos colectores, con el script mencionado anteriormente se calculó esta eficiencia y se muestra a continuación la gráfica para ese día.



**Figura 83. Eficiencia óptica de los colectores solares, 02 julio 2015**

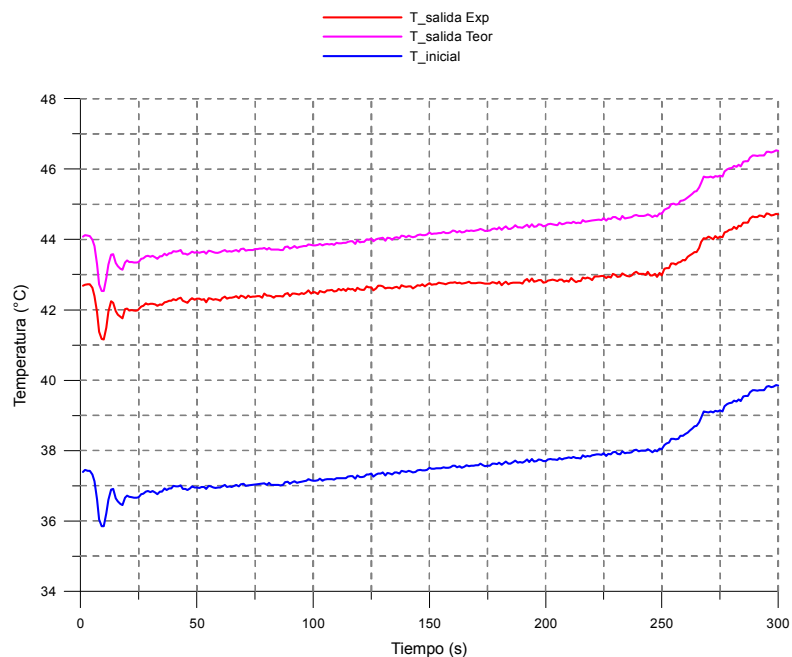
## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

La prueba fue desarrollada a las 13:50 hrs, los datos para los cálculos tanto teóricos como experimentales para esa hora de la prueba, son los siguientes:

Irradiación solar ( $I_b = 698 \frac{W}{m^2}$ ), temperatura ambiente ( $T_a = 23.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ), presión atmosférica ( $P_a = 1.01 \text{ bar}$ ), velocidad del viento ( $V_a = 2.2 \text{ m/s}$ ), presión manométrica ( $P_i = 0.7822 \text{ bar}$ ), flujo volumétrico ( $\dot{m}_v = 0.0009 \frac{m^3}{s}$ ).

Los resultados obtenidos son mostrados a continuación por medio de gráficas hechas para la duración de la prueba.

En la gráfica de la Figura 84, se muestra la temperatura de salida para el colector cilindro parabólico, de manera teórica y de manera experimental.



**Figura 84. Temperatura de salida colectores parabólicos, 02 julio 2015**

La Figura 84, muestra las condiciones atmosféricas mencionadas de este día, una mayor temperatura de manera teórica, donde para este caso las temperaturas se mantuvieron en gradientes de temperatura prácticamente constantes, ya sea de manera teórica o de manera experimental. Es de mencionar, que la disminución de temperatura que se tiene al inicio, es debido a que la temperatura del agua almacenada en el tinaco era menor a la de la temperatura del agua, ubicada en la posición del termopar.

En la Figura 85, se presenta la eficiencia térmica obtenida de manera teórica y de manera experimental para el colector cilindro parabólico.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

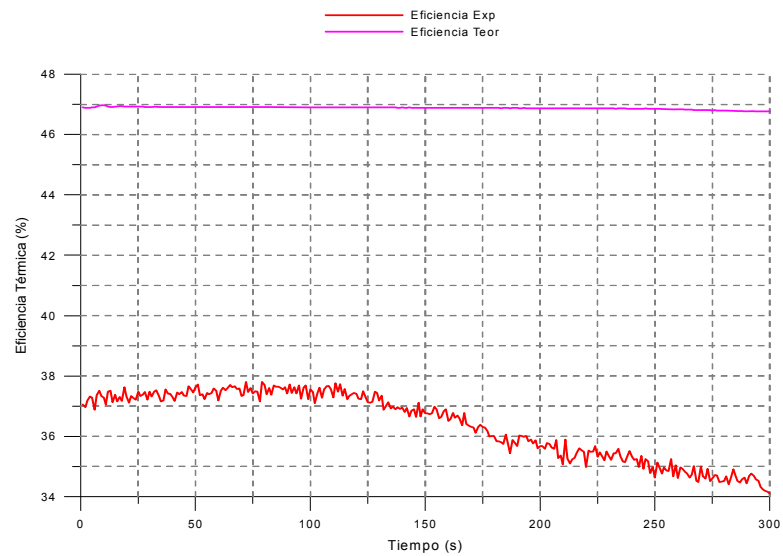


Figura 85. Eficiencia térmica colectores parabólicos, 02 julio 2015

Para el caso de la eficiencia térmica del colector parabólico, se tiene una eficiencia mejor en el caso teórico, y como ya se ha mencionado para el caso de la eficiencia experimental, la variación en los gradientes de temperatura experimental, hace que se tenga una mayor variación en la eficiencia.

La gráfica 86, muestra la temperatura de salida teórica y experimental para el caso de los colectores fresnel lineal.

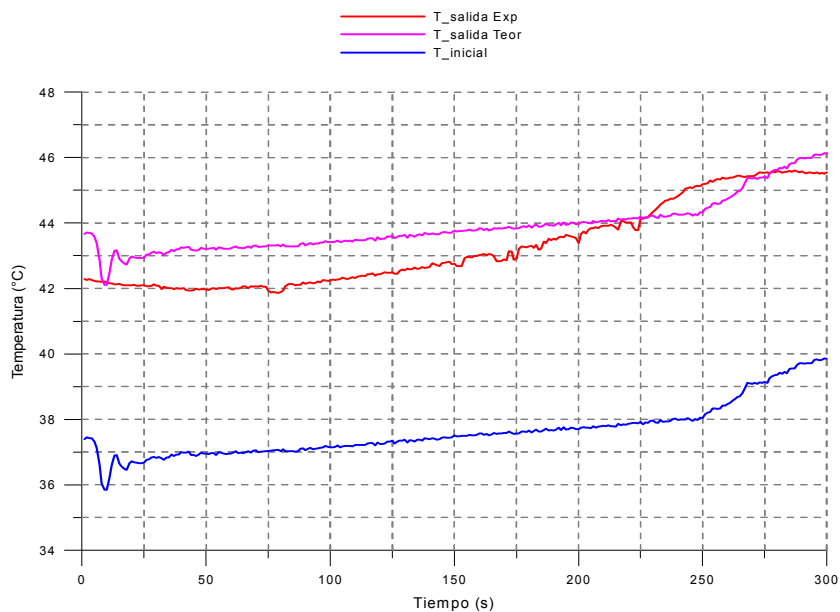
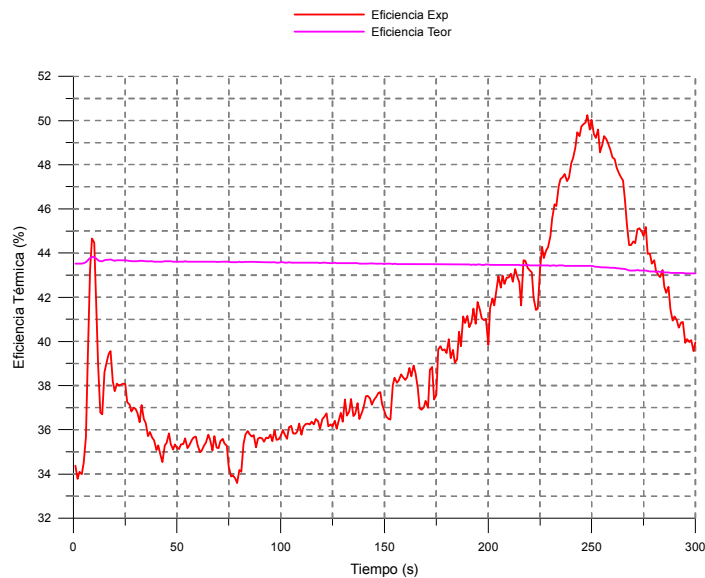


Figura 86. Temperatura de salida colector fresnel lineal, 02 julio 2015

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

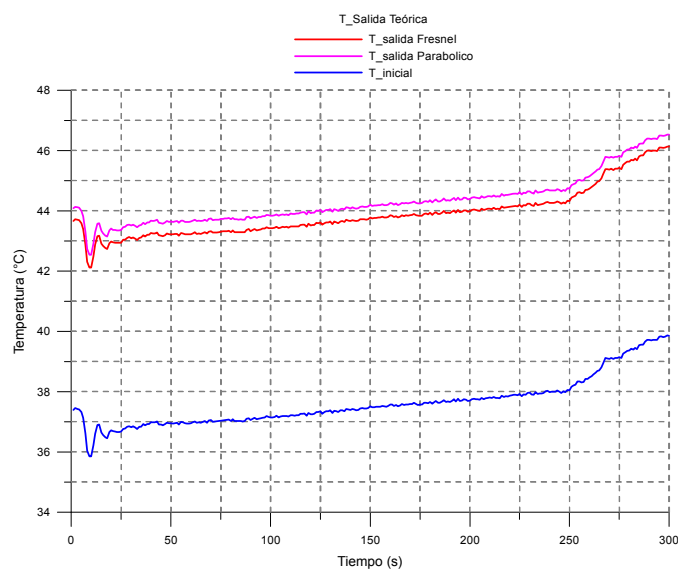
Las eficiencias térmicas teórica y experimental son mostradas en la gráfica de la Figura 87.



**Figura 87. Eficiencia térmica colector fresnel lineal, 02 julio 2015**

En la Figura 87, se puede observar de una manera más clara lo mencionado anteriormente, de que en la parte experimental, una variación en los gradientes de temperatura, representan una gran variación en la eficiencia térmica experimental de hasta 12 valores porcentuales, mientras que para el caso de la eficiencia teórica la variación es mucho menor, incluso menor en 1 punto porcentual.

Para la prueba realizada este día, la primera comparación de los colectores, es la de la temperatura de salida de manera teórica, Figura 88, donde se puede observar una mayor temperatura para el caso de los colectores parabólicos, donde se tiene un 1 °C de diferencia entre ellas.



**Figura 88. Temperaturas teóricas de salida, 02 julio 2015**

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Para el caso de las temperaturas de salida de manera experimental, Figura 89, se tiene una variación referente a cual colector genera una mayor temperatura de salida, dado que en ciertos puntos de la prueba es mayor la temperatura obtenida en los colectores parabólicos, pero el mayor gradiente de temperatura fue para el colector fresnel lineal, lo que nos indica, que este colector tiene una mejor transferencia de temperatura dadas las condiciones atmosféricas.

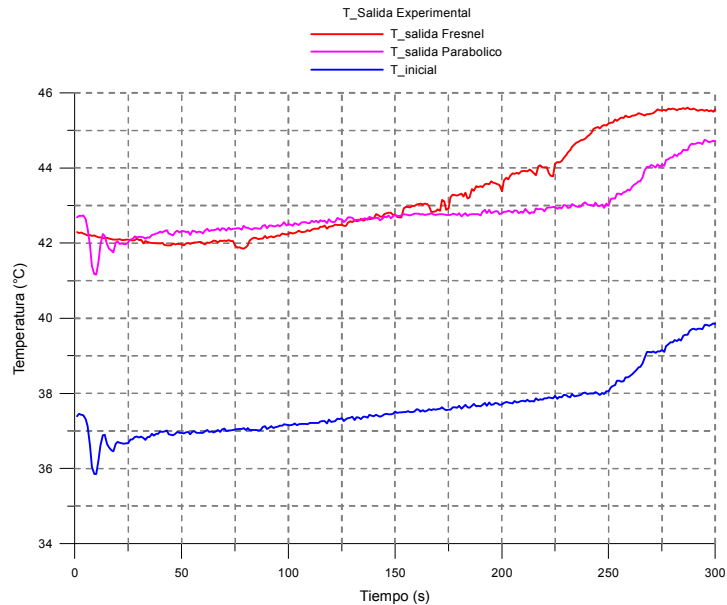


Figura 89. Temperaturas experimentales de salida, 02 de julio 2015

En la gráfica de la Figura 90, se muestran las temperaturas de salida, tanto teóricas como experimentales para ambos colectores.

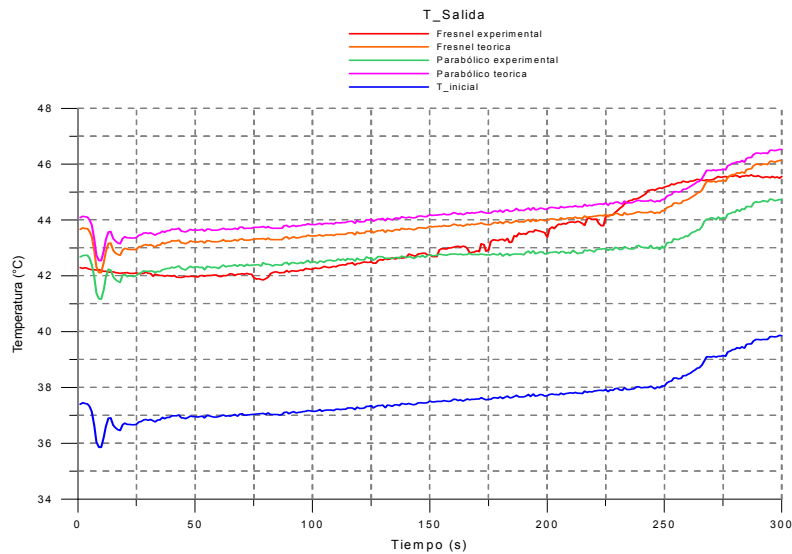
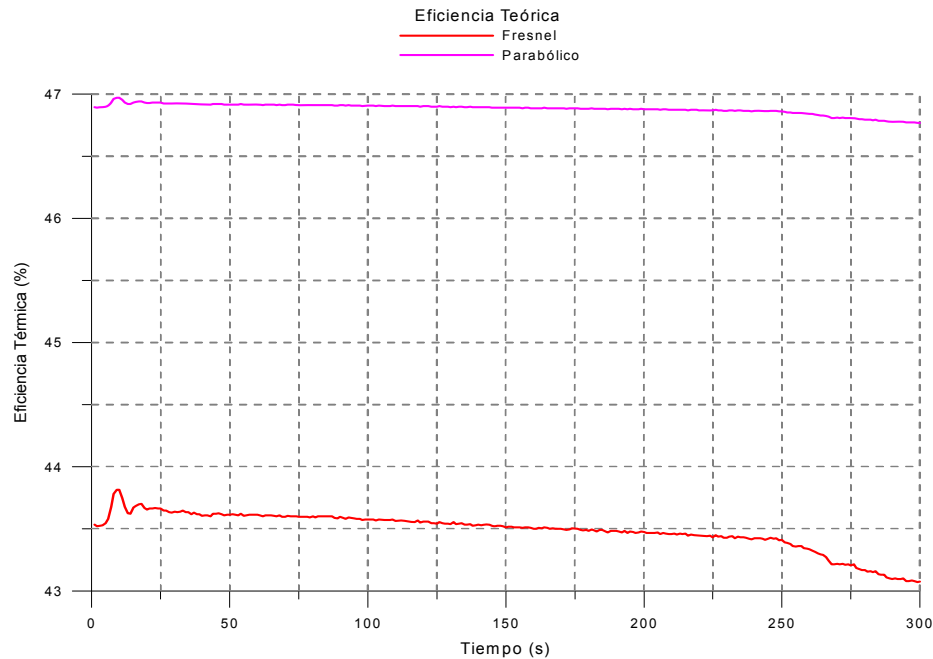


Figura 90. Temperaturas de salida teóricas y experimentales, 02 julio 2015

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

La comparación realizada entre los colectores con la temperatura de salida de manera teórica y experimental, de acuerdo a la Figura 90, muestra un punto donde la temperatura experimental en el colector fresnel, es mayor a cualquier otra, para este caso podemos decir que el colector fresnel, puede ser competitivo con una tecnología con más desarrollo como lo es el colector cilindro parabólico.

La comparación de la eficiencia entre ambos colectores también fue desarrollada de la misma manera, en la gráfica de la Figura 91, se muestran los resultados obtenidos y en la tabla 14, se pueden apreciar algunos valores graficados.



**Figura 91. Eficiencia térmica teórica, 02 julio 2015**

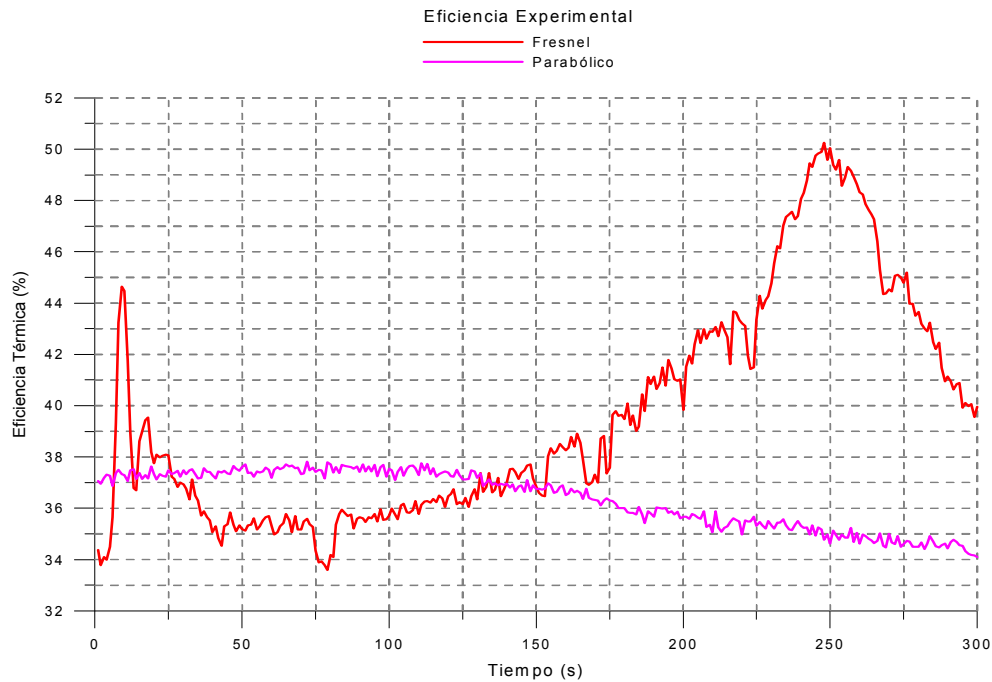
**Tabla 14. Eficiencias térmicas teóricas, 02 julio 2015**

Tiempo (s)	Eficiencia Térmica (%)	
	Parabólico	Fresnel
1	46.895	43.533
50	46.917	43.613
100	46.907	43.577
150	46.889	43.511
200	46.879	43.475
250	46.862	43.412
300	46.77	43.073

La siguiente comparación, es la de la eficiencia térmica de manera teórica, Figura 91, donde se observa una eficiencia mayor para el colector parabólico, cercana a 3.5 valores porcentuales.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

En lo que se refiere a la eficiencia de manera experimental, Figura 92, se puede observar en gran parte de la prueba una mayor eficiencia del colector fresnel, esto debido que se tiene un mayor gradiente de temperatura en la parte experimental, lo que nos da una mayor variación en la eficiencia del colector fresnel. En la tabla 15, se muestran algunos de los valores gráfícados



**Figura 92. Eficiencia térmica experimental, 02 julio 2015**

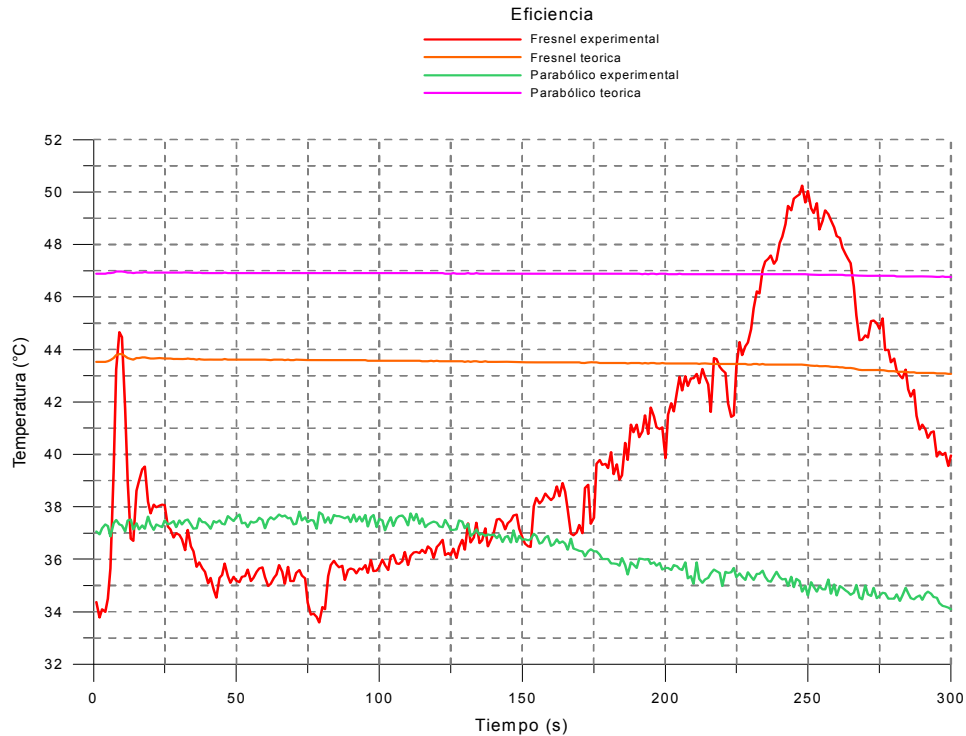
**Tabla 15. Eficiencias térmicas experimentales, 02 julio 2015**

Tiempo (s)	Eficiencia Térmica (%)	
	Parabólico	Fresnel
1	37.060	34.376
50	37.614	35.184
100	37.550	35.713
150	36.753	36.820
200	35.671	39.841
250	34.621	50.039
300	34.096	39.959



## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

En la Figura 93, se muestran las eficiencias térmicas para ambos colectores de manera experimental y de manera teórica, y en la tabla 16, se puede apreciar algunos de los valores graficados.



**Figura 93. Eficiencias térmicas teórica y experimental, 02 julio 2015**

Como se ha mencionado, las variaciones en las eficiencias experimentales vistas en la Figura 93, se deben a las variaciones de temperatura de salida, dado que si tenemos una variación en el gradiente de temperatura de 5 °C, se puede tener una variación de hasta 10 puntos porcentuales en la eficiencia.

**Tabla 16. Eficiencias térmicas teórica y experimental, 02 julio 2015**

Tiempo (s)	Eficiencia Térmica (%), teórica		Eficiencia Térmica (%) Experimental	
	Parabólico	Fresnel	Parabólico	Fresnel
1	46.895	43.533	37.060	34.376
50	46.917	43.613	37.614	35.184
100	46.907	43.577	37.550	35.713
150	46.889	43.511	36.753	36.820
200	46.879	43.475	35.671	39.841
250	46.862	43.412	34.621	50.039
300	46.77	43.073	34.096	39.959

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

Como se puede observar, las eficiencias determinadas de manera teórica mantienen un comportamiento casi de manera constante, siendo mayor la eficiencia para el caso del colector parabólico, mientras que para la parte experimental, las variaciones de la eficiencia son grandes, debido a los gradientes de temperatura, en este caso y como ya se mencionó, debido a la irradiación menor obtenida en este día, el comportamiento de los colectores fue mejor el del fresnel lineal y se ve reflejada en su eficiencia térmica experimental, siendo mayor en algunos casos incluso que la teórica del colector parabólico.

### 5.2 ECONÓMICOS

Como el presente caso de estudio está basado solamente en los campos solares de concentración, no está orientado en la producción de energía eléctrica que se tendrá por parte de la planta híbrida de ciclo binario, geotérmica y solar, es por eso que no se toma en consideración los costos de operación y de mantenimiento, así como los ingresos que se tendrán con cada uno de los campos solares, ni las potencias que pueden ser obtenidas en la planta mencionada. Es por eso que este estudio se avoca, solamente a los costos de inversión para cada uno de los campos de colectores solares.

Se realizó una comparación económica, mediante dos formas, una de ellas tomando el costo de inversión para el área de captación total de los dos campos de colectores y la otra tomando únicamente el área de captación efectiva utilizada en las pruebas de cada uno de los dos tipos de colectores solares.

Actualmente en México no se ha desarrollado de manera muy comercial los concentradores lineales fresnel, por lo tanto se tomaron los precios entregados por el proveedor de los concentradores para la instalación total del campo, que fue el mismo para los dos tipos de colectores.

El costo de la instalación total para el campo de los colectores solares parabólicos fue de \$1, 259, 934.00, que incluyo:

- 110 concentradores solares parabólicos con superficie de aluminio anodizado altamente reflejante a irradiación solar, cada concentrador incluye receptor térmico de alta eficiencia de material adecuado para el manejo de fluido geotérmico (acero inoxidable), base de sustentación construida en acero estructural galvanizado.
- 6 módulos de control electrónico de rastreo solar con ajuste en 1 eje de movimiento para 2 filas. Incluye servomotor y accesorios para instalación.
- Instalación de sistema hidráulico de interconexión entre filas de colectores con aislamiento térmico en fibra de vidrio con terminado de aluminio. Se incluyen válvulas de alivio y de terminado, indicadores de temperatura y presión en cada fila.
- Material y mano de obra para realización de dados de concreto para soportes de colectores.
- Mano de obra para armado de colectores, viáticos para servicio de instalación y envío de colectores al sitio.

Mientras que el costo para la instalación total del campo de colectores fresnel lineal fue de \$1, 187, 318.00 que incluyo:

- 9 módulos de colectores fresnel con superficie de aluminio anodizado altamente reflejante a irradiación solar. Cada módulo incluye receptor térmico de alta eficiencia y base de sustentación construida en acero estructural.

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

- 9 controles electromecánicos de rastreo solar con ajuste en 1 eje de movimiento. Incluye mecanismo y electrónica de control de seguimiento solar y accesorios para instalación.
- Instalación de sistema hidráulico de interconexión entre receptores de colectores. Se incluyen trabajos de soldaduras, válvulas de alivio, indicadores de temperatura y presión.
- Mano de obra e ingeniería para armado de colectores, viáticos y envío de los colectores al sitio.
- Material y mano de obra de para la realización de cimentaciones civiles para soportar los colectores.

Como se puede observar, se tiene un costo total mayor para el campo de colectores solares parabólicos, pero si se realiza esta comparación con referencia al área de captación efectiva ( $\$/m^2$ ) de cada uno de los campos, se tendría para el caso de los concentradores parabólicos  $1,702.6135 \$/m^2$  y para el caso de los concentradores fresnel se tendría  $4,240.421 \$/m^2$ , lo que nos indica un menor costo para el caso de los concentradores parabólicos en relación al área efectiva de captación.

Como uno de los parámetros para realizar la comparación de los colectores solares, fue el área efectiva de captación de cada uno de ellos, se obtuvo el costo de manera unitaria, para cada uno de los componentes descritos anteriormente, que son parte de los campos de concentradores solares.

En la tabla 17, se muestran los costos unitarios para el caso de los colectores solares parabólicos, así como las cantidades que fueron utilizadas en las pruebas.

**Tabla 17. Precios de concentradores parabólicos**

Cantidad	Descripción	Unitario \$MXN	Total \$MXN
20	Concentrador Solar Parabólico, superficie altamente reflejante a irradiación solar, cada concentrador incluye receptor térmico de alta eficiencia, base de sustentación construida en acero estructural galvanizado.	\$6,890.00	\$137,800.00
1	Módulo de control electrónico de rastreo solar con ajuste en 1 eje en movimiento para dos filas de 10 módulos c/u. Incluye servomotor y accesorios para instalación.	\$15,275.00	\$15,275.00
1	Instalación de sistema hidráulico de interconexión entre filas de colectores con aislamiento térmico en fibra de vidrio con terminado en aluminio, se incluyen válvulas de alivio y de paso, indicadores visuales de temperatura y presión en cada fila.	\$13,000.00	\$13,000.00
1	Mano de obra para armado de colectores con personal capacitado y viáticos.	\$12,060.00	\$12,060.00
1	Material y mano de obra para realización de cimentaciones de concreto para soporte de colectores.	\$8,300.00	\$8,300.00
		Subtotal	\$186,435.00
		IVA 16%	\$29,829.60
		<b>TOTAL</b>	<b>\$216,264.60</b>

**COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA**

Para el caso de los concentrados parabólicos se tendría una relación de costo área de utilización en las pruebas, de 2,835 \$/m<sup>2</sup>.

Mientras que para el caso de los colectores fresnel lineal, en la tabla siguiente se muestran los costos unitarios requeridos para la instalación del área de prueba que se utilizó.

**Tabla 18. Precios de concentradores fresnel lineal**

Cantidad	Descripción	Unitario \$MXN	Total \$MXN
4	Módulo de colectores solares Fresnel Lineal, con superficie altamente reflejante a irradiación solar, cada módulo incluye receptor térmico de alta eficiencia y base de sustentación construida en acero estructural.	\$44,500.00	\$178,000.00
1	Control electromecánico de rastreo solar con ajuste en 1 eje de movimiento. Incluye mecanismo y electrónica de control de seguimiento solar y accesorios para instalación.	\$16,250.00	\$16,250.00
1	Instalación de sistema hidráulico de interconexión entre colector y proceso. Se incluyen trabajos de soldadura, válvulas de alivio y de paso, indicadores visuales de temperatura y presión en cada interconexión.	\$9,500.00	\$9,500.00
1	Mano de obra para armado de colectores con personal capacitado y viáticos.	\$10,640.00	\$10,640.00
1	Material y mano de obra para realización de cimentaciones de concreto para soporte de colectores.	\$10,100.00	\$10,100.00
		Subtotal	\$224,490.00
		IVA 16%	\$35,918.40
		<b>TOTAL</b>	<b>\$260,408.40</b>

Para los colectores fresnel lineal, de acuerdo al área de utilización en las pruebas, tenemos una relación de costo área de 3,390 \$/m<sup>2</sup>.

Aunque en los dos campos la relación de costo área fue menor, aún sigue siendo más elevado el costo en los concentradores fresnel lineal, esto debido principalmente, a que la tecnología fresnel lineal no está muy desarrollada actualmente, en el país. Lo que para poder realizar la instalación de este tipo de tecnología se tuvo que desarrollar por parte del proveedor, una ingeniería prácticamente nueva para él, donde precisamente se vio reflejada, en el elevado costo de los colectores fresnel.

---

---

## CAPITULO 6 CONCLUSIONES

---

---

El desarrollo de las tecnologías en captación solar día a día va creciendo de una manera muy importante a nivel mundial y el poder integrar este tipo de tecnologías con otro tipo de energía renovable puede llegar a ser uno de los factores más importantes para la reducción del costo de inversión en procesos de energía limpia, además de reducir en gran cantidad los efectos de gases invernadero en los países, así como las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera.

Este trabajo realizado, puede ser visto como un trabajo sencillo y quizá muy peculiar para un lugar, pero puede ayudar a definir tomando consideraciones, tanto teóricas como experimentales, el uso de alguna tecnología de captación solar de foco lineal en específico.

A pesar de que actualmente la tecnología solar más desarrollada en la industria de la generación de energía eléctrica ya sea de manera directa, o de manera integral (en conjunto con otra fuente de generación de energía eléctrica), es la de colectores cilindro parabólicos, el crecimiento que está teniendo la tecnología fresnel lineal, es muy importante y es posible que sea desarrollada en mayor cantidad, dada su mayor facilidad de construcción, montaje y mantenimiento, su menor área de tierra ocupada para su instalación, así como el poder mejorar su diseño, es decir, en este caso teníamos 4 tubos receptores desnudos, una opción de mejorar su rendimiento, sería colocar un tubo de cristal que cubra al tubo receptor de acero. Otra opción sería tener una placa de cristal en conjunto con el receptor secundario, para que los tubos receptores se encuentren en un ambiente de efecto invernadero.

Para este trabajo de manera específica, la mayor parte de los resultados nos dan un mejor comportamiento de los colectores parabólicos, como lo mostraron las figuras en el capítulo 5 de resultados, donde de manera teórica, todos los valores obtenidos son mejores para este tipo de tecnología, es decir la temperatura de salida y las eficiencias óptica y térmica. Y de manera experimental en ciertos espacios de la prueba tuvo mejores resultados el fresnel lineal, principalmente en la eficiencia térmica, donde incluso llego a tener valores cercanos a 15 puntos porcentuales más que el colector parabólico, lo que indica que a pesar de no tener un gran desarrollo la tecnología fresnel puede competir con tecnologías ya más estables en el mercado comercial.

Es importante mencionar, que la tecnología fresnel tiene un mejor rendimiento para flujos menores, debido a que la distribución en sus tubos receptores es mejor, y se tiene un tiempo de residencia mayor, lo que permite un mayor intercambio de calor entre el tubo receptor y el fluido de trabajo.

Además como fue observado en la prueba del día 2 de julio de 2015 en lo referente a la eficiencia térmica de manera experimental, la tecnología fresnel presenta durante la etapa de trabajo un mejor comportamiento ante la variación de irradiación solar.

Durante las pruebas fue observado la corrosión que se va formando en los tubos que transportan el fluido geotérmico, esto debido a su contenido de sales, dada esta situación, la tecnología fresnel sería más adecuada para su uso con este tipo de fluido, debido a que los tubos receptores tienen un mayor diámetro interior, y durarían más tiempo en sufrir incrustaciones y a la vez su tiempo de vida útil sería mayor.

En referencia al análisis económico de los costos de inversión para los dos campos de colectores solares, se tiene un mayor costo para los colectores fresnel lineal, esto como ya fue mencionado, principalmente debido a que en México este tipo de tecnologías no se encuentran muy desarrolladas, lo

## *COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA*

que genera un alto costo para su adquisición. Pero en lugares donde ya se tiene un mayor desarrollo de esta tecnología el costo de inversión es mucho menor a los de los concentradores parabólicos.

Se desarrolló un mantenimiento preventivo en los dos campos de concentradores, específicamente en el área de captación efectiva que fue utilizada durante las pruebas, donde se observó una mayor facilidad para poder desarrollar este mantenimiento, además de que el tiempo en que fue desarrollado el mantenimiento fue mucho menor en los concentradores fresnel lineal.

El periodo de vida útil es mayor para el caso de los colectores fresnel lineal, para nuestro caso de estudio, debido a que los receptores parabólicos tiene cubierta de vidrio, la cual es más factible para sufrir algún daño, al estar de manera directa en contacto con varias de las condiciones atmosféricas (lluvia, viento, polvo, etc).

El desarrollo experimental en estos concentradores de la planta de Simirao, además de los resultados obtenidos, nos permitirá el desarrollo de un artículo de un impacto considerable, donde se realizó el cálculo de un factor empírico para la determinación del ángulo de incidencia para los colectores fresnel, para únicamente estas condiciones específicas, tanto atmosféricas como de operación.

Actualmente la utilización de este tipo de concentradores está muy orientado a la generación de energía eléctrica, se pueden tener otro tipo de aplicaciones de ellos, por mencionar algunos, el calentamiento de agua para servicios en grandes establecimientos, como los son hoteles y centros recreativos.

---

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

---

- [1] M. D. Torres, *Energías renovables y eficiencia energética*. 2008.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. 2011.
- [3] E. Soria, “Energías renovables para todos: Energía Hidráulica,” p. 20, 2003.
- [4] Sener, “Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México 2009,” p. 70, 2009.
- [5] E. V. D. E. L. O. S. R. Eólicos, “Información General Sobre Energía Eólica,” p. 23, 2002.
- [6] “La Energía Eólica En MÉXICO.”
- [7] “Energía renovable : la biomasa Conceptos y definiciones.”
- [8] C. de E. Renovables, “Energía Marina.”
- [9] E. Marina, “Energía marina,” pp. 1–5.
- [10] J. a. Duffie and W. a. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes (Google eBook)*. 2013.
- [11] J. Mun, J. M. Martínez-val, and A. Ramos, “Thermal regimes in solar-thermal linear collectors,” vol. 85, pp. 857–870, 2011.
- [12] D. Barlev, R. Vidu, and P. Stroeve, “Solar Energy Materials & Solar Cells Innovation in concentrated solar power,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 10, pp. 2703–2725, 2011.
- [13] W. Vogel and H. Kalb, *Large-Scale Solar Thermal Power*. 2010.
- [14] C. Rau, S. Alexopoulos, G. Breitbach, B. Hoffschmidt, M. Latzke, and J. Sattler, “Transient Simulation Of A Solar-Hybrid Tower Power Plant With Open Volumetric Receiver At The Location Barstow,” vol. 00, 2013.
- [15] S. a. Kalogirou, “A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver,” *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 298–306, 2012.
- [16] U. Development and S. S. Donovan, “B r í e f i n,” *Mortg. Bank.*, vol. 48, pp. 2–3, 2009.
- [17] C. J. Kuo, C. Huang, and Y. Kuo, “Analysis of processing parameters in fabrication of Fresnel lens solar collector,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 57, pp. 33–41, 2012.
- [18] D. R. Mills and G. L. Morrison, “Compact Linear Fresnel Reflector solar thermal powerplants,” *Sol. Energy*, vol. 68, no. 3, pp. 263–283, 2000.

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

- [19] R. Abbas and M. Valdés, "High concentration linear Fresnel reflectors," *Energy Convers. Manag.*, vol. 72, pp. 60–68, 2013.
- [20] R. Baner, "Analysis of heat losses from a trapezoidal cavity used for Linear Fresnel reflectors system," 2012.
- [21] Ce. García de la Noceda, "Enseñanza de las ciencias de la Tierra," *Geotherm. Resour.*, vol. 16, no. 3, pp. 239–247, 2008.
- [22] R. Dipippo, *Geothermal Power Plants*, Second Edi. 2007.
- [23] A. G. Gutierrez, E. Iglesias, and V. M. A. Gómez, "La energía geotérmica; una opción tecnológica y económicamente madura," *Bol. IIE Tendencias Tecnológicas*.
- [24] J. C. Viggiano-guerra, L. C. A. Gutiérrez-negrín, and A. Volta, "The Geothermal System of Araró, Mexico, as an Independent System of Los Azufres," no. April, pp. 24–29, 2005.
- [25] G. Cau and D. Cocco, "Comparison of medium-size concentrating solar power plants based on parabolic trough and linear Fresnel collectors," *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 101–110, 2014.
- [26] G. Morin, J. Dersch, W. Platzer, M. Eck, and A. Häberle, "Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants," *Sol. Energy*, vol. 86, pp. 1–12, 2012.
- [27] N. El Gharbi, H. Derbal, S. Bouaichaoui, and N. Said, "A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies," *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 565–572, 2011.
- [28] D. Chemisana and M. Ibáñez, "Linear Fresnel concentrators for building integrated applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 7, pp. 1476–1480, 2010.
- [29] M. I. E. R., V. J., and B. J., "Performance analysis of a hybrid solar-geothermal power plant in northern Chile," *World Renew. Energy Congr.*, 2011.
- [30] S. a. Kalogirou, *Solar thermal collectors and applications*, vol. 30. 2004.
- [31] O. a. Jaramillo, E. Venegas-Reyes, J. O. Aguilar, R. Castrejón-García, and F. Sosa-Montemayor, "Parabolic trough concentrators for low enthalpy processes," *Renew. Energy*, vol. 60, pp. 529–539, 2013.
- [32] E. E. Contreras, J. Gabriel, B. Saldaña, C. G. Torres, P. Q. Diez, and J. A. J. Bernal, "Aplicación del Software SOLEEC para Diseñar Colectores Solares de Canal Parabólico," pp. 135–143, 2013.
- [33] H. M. Güven and R. B. Bannerot, "Determination of error tolerances for the optical design of parabolic troughs for developing countries," *Sol. Energy*, vol. 36, no. 6, pp. 535–550, 1986.
- [34] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering*, 1st editio. New York, 2009.



COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

- [35] H. Yılmaz and M. S. Söylemez, "Thermo-mathematical modeling of parabolic trough collector," vol. 88, pp. 768–784, 2014.
- [36] S. M. J. Jeter, S. A. Moustafa, and D. I. Jarrar, "Geometrical effects on the performance of trough collectors," *Sol. Energy*, vol. 30, no. 2, pp. 109–113, 1983.
- [37] R. B. Bannerot, "OPTICAL AND THERMAL ANALYSIS OF PARABOLIC TROUGH SOLAR COLLECTORS FOR TECHNICALLY LESS DEVELOPED COUNTRIES," 1984.
- [38] "Parabolic Trough Collector System for Low Temperature Steam Generation.pdf." .
- [39] E. Venegas-Reyes, O. A. Jaramillo., R. Castrejón-García, J. O. Aguilar., and F. Sosa-Montemayor., "Design, construction, and testing of a parabolic trough solar concentrator for hot water and low enthalpy steam generation," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 35–50, 2012.
- [40] T. Harms, "Design, construction and testing of a parabolic trough solar collector for a developing-country application."
- [41] T. E. D. E. Una and C. García, "ESTUDIO TÉCNICO- CENTRAL TERMOSOLAR CON C ON TECNOLOGÍA FRESNEL."
- [42] H. A, Z. C, L. H, M. M, W. C, T. F, and D. J., "The Solarmundo line focussing Fresnel collector. Optical and thermal performance and cost calculations.," in *Presented at SolarPaces*, 2002.
- [43] J. A. Romero, "Análisis de prestaciones de las sales fundidas como fluido de transferencia de calor en una central termosolar de colectores cilindro parabolicos."
- [44] S. Noordeen, K. Karthikeyan, and M. a N. Parveen, "Design and Analysis for 1 MWe parabolic trough solar collector plant based on DSG method," vol. 2, no. 4, pp. 388–397, 2013.
- [45] Incropera, D. Witt, T. L. Bergman, and Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Sixth Edit. .
- [46] V. E. Sweat, "A miniature thermal conductivity probe for foods," *Am. Soc. Mech. Eng.*, vol. Paper 76-H, 1976.
- [47] C. P. Kothandaraman and S. Subramanyan, *Heat and Mass Transfer Data Book*. New York, 1975.
- [48] J. P. Holman, *Transferencia de Calor*. .
- [49] U. D. E. Apoyo, C. Para, E. L. Saneamiento, S. Del, and R. E. A. Rural, "Teoría para el diseño de calentadores solares de agua."
- [50] *Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor*, vol. 5. 2014.
- [51] H. Liang, S. You, and H. Zhang, "Comparison of different heat transfer models for parabolic trough solar collectors," vol. 148, pp. 105–114, 2015.

*COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA*

- [52] J. O. Baz, "DISEÑO DE SISTEMA CONCENTRADOR SOLAR CILÍNDRICO-PARBÓLICO PARA ALIMENTOS Jorge Orlando Bazán Díaz," 2009.

# COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

## ANEXOS

### ANEXO I

```
input ('PROGRAMA PARA CÁLCULO DE EFICIENCIA OPTICA')

%%Datos del colector parabólico

Wa= 1.23;           % Apertura del colector p arabólico
D_ext = 0.033;      % Diametro exterior del tubo receptor
C= Wa/(pi*D_ext);  % Razón de concentración
f= 0.341;          % Distancia focal
hp= 0.341;         % Altura de la parabola

R_par=0.9;         % Reflectancia del espejo parabólico
T_par= 0.92;       %Transmitancia de la cubierta de cristal
A_par= 0.93;       %Absortancia del tubo del tubo receptor

%%Datos del colector fresnel

R_fre=0.9;         % Reflectancia del espejo fresnel
A_fre= 0.90;       %Absortancia del tubo del tubo receptor
F_fre= 0.72;       %Calculo empirico para el fresnel

Af= (2/3*Wa*hp)+ (f*Wa*(1+(Wa^2)/(48*f^2))); % Factor geométrico

%Parametros de errores para el cálculo de la incidencia normal

Ssun= 0.004; %Desviaci n del ángulo del cono solar
Ssem= 0.010; %Error por ajuste de seguimiento
Smir= 0.006; %Errores de superficie

%Incidencia normal

S= sqrt(Ssun^2+(4*Ssem^2)+Smir^2);

y_par= 0.876;
y_fre= 0.823;

%Para el cálculo de la eficiencia óptica

n = input ('Numero del día del año, n= ');
B= (n-1)*(360/365);

d = (180/pi)*(0.006918- 0.399912*cosd(B)+0.070257*sind(B)-
0.006758*cosd(2*B)+0.000907*sind(2*B)-0.002697*cosd(3*B)+0.00148*sind(3*B));

x=zeros (18-6,1);
y1=zeros (18-6,1);
y2=zeros(18-6,1);
y3=zeros (18-6,1);
```

*COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA*

```
y4=zeros (18-6,1);
k=1;

I_b= input ('Ingresa el valor de la irradiación, I_b = ');

for h_dia = 6:18
    h= 15 * (h_dia-12);
    x(k,1)=h_dia;
    Te = acosd (sqrt(1-(((cosd(d))^2)*((sind(h))^2))));
    Te_fre= acosd(F_fre*cosd(Te));
    ETA_opt= R_par*T_par*A_par*y_par*(1-(Af*tand(Te)*cosd(Te)))*100;
    y1(k,1)=ETA_opt;
    ETA_optfre = R_fre*A_fre*y_fre*cosd(Te_fre)*100;
    y2(k,1)=ETA_optfre;
    k=k+1;
end
ETA=max(y1);
ETA2=max(y2);
plot (x,y1,x,y2)
xlabel('Hora del día');
ylabel ('Eficiencia Óptica, %')
Legend ('Colector Parabólico', 'Colector Fresnel');
```

# COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

## ANEXO II

```
input ('PROGRAMA PARA EL ANALISIS TÉRMICO')

%%Datos Conocidos

D_ext_v= 0.044; %[m] Diametro exterior de la cubierta de vidrio
D_int_v= 0.038; %[m] Diametro interior de la cubierta de vidrio
D_ext_r= 0.033; %[m] Diametro exterior del tubo receptor
D_int_r= 0.030; %[m] Diametro interior del tubo receptor
w_a= 1.23; %[m] Apertura del colector parabólico
L= 3.1; %[m] Longitud del colector parabólico
NC= 10; %Número de concentradores parabólicos
NL= 2; %Número de líneas de concentradores parabólicos
f=0.341; % [m] Distancia focal
h_p=0.341; % [m] Altura de la parabola

R_par=0.9; % Reflectancia del espejo parabólico
T_par= 0.92; %Transmitancia de la cubierta de cristal
A_par= 0.93; %Absortancia del tubo del tubo receptor

Af= (2/3*w_a*h_p)+(f*w_a*(1+(w_a^2)/(48*f^2))); % Factor geométrico

% Factor de intercepción
y_par= 0.876;

e_v= 0.92; %Emisividad de la cubierta de vidri
e_r= 0.87; %Emisividad del tubo receptor
sigma = 5.6704E-8; %[W/(m2*K4)] "Constante de Stefann-Boltzmann"

input ('Ingresa los siguientes valores')

n = input ('Numero del día del año, n= ');
B= (n-1)*(360/365);
d = (180/pi)*(0.006918- 0.399912*cosd(B)+0.070257*sind(B)-
0.006758*cosd(2*B)+0.000907*sind(2*B)-0.002697*cosd(3*B)+0.00148*sind(3*B));
h_dia = input ('Hora del dia entre 6 a 18 horas, h_dia= ');
h= 15*(h_dia-12);
Te = acosd (sqrt(1-(((cosd(d))^2)*((sind(h))^2))));
ETA_o= R_par*T_par*A_par*y_par*(1-(Af*tand(Te)*cosd(Te)))*100 %Eficiencia
óptica del colector parabólico
nombearchivo= input ('Especifica nombre de archivo de datos, ->')
nombrehoja= input ('Especifica nombre de hoja de datos, ->')
mtz= xlsread (nombearchivo,nombrehoja);
T_a= mtz (1,1) %input ('Temperatura ambiente, T_a [°C] = ');
P_a= mtz (1,2) %input ('Presión atmosférica, P_a [bar] = ');
V_a= mtz (1,3) %input ('Velocidad del viento, V_a [m/s] = ');
I_b= mtz (1,4) %input ('Irradiación solar, I_b [W/m2] = ');
T_i= 0 %input ('Temperatura inicial, T_i [°C] = '); %Temperatura de entrada
a los colectores parabólicos"
P_i= mtz (1,6) %input ('Presión línea de trabajo, P_i [bara] = '); %Presión
de la línea de los colectores parabólicos"
m_v= mtz (1,7) %input ('Flujo másico en concentradores parabólicos, m_v
[kg/s] = ');
```

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

```

K_a= airProp2(T_a+273.15, 'k');      %K_a ('Conductividad térmica del aire,
K_a [W/m*K] = ');
d_a= airProp2(T_a+273.15, 'rho');   %d_a= input ('Densidad del aire, d_a
[Kg/m3] = ');
Cp_a= (airProp2(T_a+273.15, 'cp'))/1000; %Cp_a= input ('Calor especifico del
aire, Cp_a [KJ/Kg*K] = ');
vis_a= airProp2(T_a+273.15, 'my');  %vis_a= input ('Viscosidad del aire,
vis_a [Pa/s] = ');

A_a=w_a*L*NC*NL;  %Area de concentrador de los colectores parabólicos
A_r=pi*D_ext_r*L*NC*NL; %Area del receptor de los colectores parabólicos
A_v=pi*D_ext_v*L*NC*NL; %Area del receptor de los colectores parabólicos

Re_a=(d_a*V_a*D_int_v)/(vis_a/d_a); %Número de Reynolds para el aire
Pr_a=(Cp_a*(vis_a/d_a))/K_a;      %Número de Prandtl para el aire

if Re_a>0.4 & Re_a<4
    c=989;
    m=0.330;
elseif Re_a>4 & Re_a<40
    c=911;
    m=0.385;
elseif Re_a>40 & Re_a<4000
    c=.683;
    m=0.466;
elseif Re_a>4000 & Re_a<40000
    c=.193;
    m=0.618;
elseif Re_a>40000 & Re_a<400000
    c=.027;
    m=0.805;
end

Nu_a=c*Re_a^m*Pr_a^(1/3);  %Número de Nusselt del aire"

Te_v= input ('Temperatura supuesta de la cubierta de vidrio, Te_v [°C] = ');
Te_r= input ('Temperatura supuesta del receptor, Te_r [°C] = ');
T_r=Te_r;
T_v=Te_v;
Tauxr=T_r;
Tauxv=T_v;
[nren, ncol]=size(mtz);
data=zeros(nren,4);

%Parámetros del fluido a condiciones de operación
for ki=1:nren
    T_i=mtz(ki,5);
    T_v=Tauxv;
    T_r=Tauxr;
    Te_r=T_r;
    Te_v=T_v;
K_w=IAPWS_IF97('k_pT',P_i*0.1,T_i+273.15); %Conductividad térmica del fluido
d_w= 1/(IAPWS_IF97('v_pT',P_i*0.1,T_i+273.15)); %Densidad del fluido
m_w=m_v*d_w;
hw=IAPWS_IF97('h_pT',P_i*0.1,T_i+273.15);

```

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

```

Cp_w=IAPWS_IF97('cp_ph',P_i*0.1,hw); %Capacidad calorifica del agua
vis_w=IAPWS_IF97('mu_pT',P_i*0.1,T_i+273.15); %Viscosidad del fluido

for i=1:10
    h_a=(Nu_a*K_a)/D_int_v; %Coeficiente convectivo aire y la cubierta
de cristal

h_r_v_a=e_v*sigma*((T_v+273.15)+(T_a+273.15))*((T_v+273.15)^2+(T_a+273.15)^2
);

h_r_r_v=(sigma*((T_v+273.15)+(T_r+273.15))*((T_v+273.15)^2+(T_r+273.15)^2))/
((1/e_r)+((A_r/A_v)*((1/e_v)-1)));
    U_L= ((A_r/((h_a+h_r_v_a)*A_v))+1/h_r_r_v)^(-1);

T_v=((A_r*h_r_r_v*T_r)+(A_v*(h_a+h_r_v_a)*T_a))/((A_r*h_r_r_v)+(A_v*(h_a+h_r
_v_a)));
    V_w= (4*m_w)/(pi*d_w*D_int_r^2); %Velocidad del fluido en el cabezal
de entrada"
    Re_w=(d_w*V_w*D_int_r)/(vis_w/d_w); %Número de Reynolds para el agua"
    Pr_w=(Cp_w*(vis_w/d_w))/K_w; %Número de Prandtl para el agua"
    Nu_w=0.023*Re_w^0.8*Pr_w^0.4; %Número de Nusselt del agua"
    h_w=(Nu_w*K_w)/D_int_r; %Coeficiente convectivo entre el receptor y
el fluido"

F_e=(1/U_L)/((1/U_L)+(D_ext_r/(h_w*D_int_r))+((D_ext_r/(2*K_w))*(log(D_ext_r
/D_int_r)))); %Factor de eficiencia del colector parabólico
    F_R= ((m_w*Cp_w)/(A_r*(U_L/1000)))*(1-(exp(-
((U_L/1000)*F_e*A_r)/(m_w*Cp_w)))); %Factor de remoción del colector
    Q_u=F_R*((I_b*(ETA_o/100)*A_a)-(A_r*U_L*(T_i-T_a))); %Calor util
entregado por el concentrador parabolico
    T_r1=(T_a+273.15)+(((I_b*(ETA_o/100)*A_a)-Q_u)/(A_r*U_L));
    T_r=T_r1-273;
    T_o1= (T_i+273.15)+(Q_u/(m_w*Cp_w*1000)); %Temperatura de salida del
concentrador
    T_o= T_o1-273.15;
    if abs(T_r-Te_r)<0.001 & abs(T_v-Te_v)<0.001
        ETA_p=(Q_u/(I_b*A_a))*100;
        fprintf('Registro: %i, converge en:%i T_r=%.2f , T_v=%.2f, T_i=%.4f,
T_o=%.4f, ETA_p=%.4f \n',ki, i, T_r, T_v, T_i, T_o, ETA_p);
        data(ki,1)=T_o;
        data(ki,2)=ETA_p;
        data(ki,3)=Cp_w;
        data(ki,4)=d_w;
        break
    end
    Te_r=T_r;
    Te_v=T_v;
    i=i+1;
end
end
dlmwrite('final.txt',data, ';')

```

# COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

## ANEXO III

```
input ('PROGRAMA PARA EL ANALISIS TÉRMICO')

%%Datos Conocidos

w_af=0.40; % Apertura del colector fresnel
D_ext_rf= 0.04826; %[m] Diametro exterior del tubo receptor fresnel
D_int_rf= 0.04272; %Diametro interior del tubo receptor fresnel
L_f= 4; %Longitud del fresnel
NC_f= 4; %Número de concentradores
NL_f= 12; %Número de lineas
NR_f= 4; %Numero d receptores

R_fre=0.9; % Reflectancia del espejo parabólico
A_fre= 0.90; %Absortancia del tubo del tubo receptor, acero carbón ASTM A
53 B"
F_fre= 0.7; %Calculo empirico para el fresnel
SB=5.6703e-8
e_r= 0.87; %Emisividad del tubo receptor"

% Factor de intercepción

y_fre= 0.823;

e_v= 0.92; %Emisividad de la cubierta de vidrio, kalogirou 2009"
e_r= 0.87; %Emisividad del tubo receptor"
sigma = 5.6704E-8; %[W/(m2*K4)] "Constante de Stefann-Boltzmann"

input ('Ingresa los siguientes valores')

n = input ('Numero del día del año, n= ');
B= (n-1)*(360/365);
d = (180/pi)*(0.006918- 0.399912*cosd(B)+0.070257*sind(B)-
0.006758*cosd(2*B)+0.000907*sind(2*B)-0.002697*cosd(3*B)+0.00148*sind(3*B));
h_dia = input ('Hora del dia entre 6 a 18 horas, h_dia= ');
h= 15*(h_dia-12);
Te = acosd (sqrt(1-(((cosd(d))^2)*((sind(h))^2))));
Te_fre= acosd(F_fre*cosd(Te));
ETA_o= R_par*T_par*A_par*y_par*(1-(Af*tand(Te)*cosd(Te)))*100 %Eficiencia
óptica del colector parabólico
ETA_of= R_fre*A_fre*y_fre*cosd(Te_fre)*100; %Eficiencia optica fresnel
nombearchivo= input ('Especifica nombre de archivo de datos, ->')
nombrehoja= input ('Especifica nombre de hoja de datos, ->')
mtz= xlsread (nombearchivo,nombrehoja);
T_a= mtz (1,1) %input ('Temperatura ambiente, T_a [°C] = ');
P_a= mtz (1,2) %input ('Presión atmosférica, P_a [bar] = ');
V_a= mtz (1,3) %input ('Velocidad del viento, V_a [m/s] = ');
I_b= mtz (1,4) %input ('Irrradiación solar, I_b [W/m2] = ');
T_i= 0 %input ('Temperatura inicial, T_i [°C] = '); %Temperatura de entrada
a los colectores parabólicos"
P_i= mtz (1,6) %input ('Presión linea de trabajo, P_i [bara] = '); %Presión
de la linea de los colectores parabólicos"
```



## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

```

m_v= mtz (1,7) %input ('Flujo másico en concentradores parabólicos, m_v
[kg/s] = ');

%Parámetros del aire a condiciones ambientales

K_a= airProp2(T_a+273.15, 'k'); %K_a ('Conductividad térmica del aire,
K_a [W/m*K] = ');
d_a= airProp2(T_a+273.15, 'rho'); %d_a= input ('Densidad del aire, d_a
[Kg/m3] = ');
Cp_a= (airProp2(T_a+273.15, 'cp'))/1000; %Cp_a= input ('Calor especifico del
aire, Cp_a [KJ/Kg*K] = ');
vis_a= airProp2(T_a+273.15, 'my'); %vis_a= input ('Viscosidad del aire,
vis_a [Pa/s] = ');

A_a=w_a*L*NC*NL; %Area de concentrador de los colectores parabólicos
A_r=pi*D_ext_r*L*NC*NL; %Area del receptor de los colectores parabólicos
A_v=pi*D_ext_v*L*NC*NL; %Area del receptor de los colectores parabólicos

A_af=w_af*L_f*NC_f*NL_f %Area de concentrador fresnel
A_rf=pi*D_ext_rf*L_f*NC_f*NR_f %Area del receptor fresnel

% Para el colector fresnel

Re_af=(d_a*V_a*D_int_rf)/(vis_a/d_a); %Número de Reynolds para el aire en
fresnel
Pr_af=(Cp_a*(vis_a/d_a))/K_a; %Número de Prandtl para el aire

if Re_af>0.4 & Re_af<4
    cf=989;
    mf=0.330;
elseif Re_af>4 & Re_af<40
    cf=911;
    mf=0.385;
elseif Re_af>40 & Re_af<4000
    cf=.683;
    mf=0.466;
elseif Re_af>4000 & Re_af<40000
    cf=.193;
    mf=0.618;
elseif Re_af>40000 & Re_af<400000
    cf=.027;
    mf=0.805;
end

Nu_af=cf*Re_af^mf*Pr_af^(1/3); %Número de Nusselt del aire"

[nren, ncol]=size(mtz);
data=zeros(nren,4);

%Parámetros del fluido a condiciones de operación
for ki=1:nren
    T_i=mtz(ki,5);
    K_w=IAPWS_IF97('k_pT',P_i*0.1,T_i+273.15); %Conductividad térmica del
fluido

```

## COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE MEDIA Y BAJA ENTALPÍA

```

d_w= 1/(IAPWS_IF97('v_pT',P_i*0.1,T_i+273.15)); %Densidad del fluido
m_w=m_v*d_w;
hw=IAPWS_IF97('h_pT',P_i*0.1,T_i+273.15); %Capacidad calorifica del agua
Cp_w=IAPWS_IF97('cp_ph',P_i*0.1,hw); %Capacidad calorifica del agua
vis_w=IAPWS_IF97('mu_pT',P_i*0.1,T_i+273.15); %Viscosidad del fluido

h_af=(Nu_af*K_a)/D_int_rf; %Coeficiente convectivo entre el aire y la
cubierta de cristal
T_o1= (T_i+273.15)+((A_af*(ETA_of/100)*I_b)/(m_w*Cp_w*1000));
%Temperatura de salida del concentrador
T_o= T_o1-273.15;

V_w= (4*m_w)/(pi*d_w*D_int_rf^2); %Velocidad del fluido en el cabezal
de entrada"
Re_wf=(d_w*V_w*D_int_rf)/(vis_w/d_w); %Número de Reynolds para el agua
fresnel
Pr_w=(Cp_w*(vis_w/d_w))/K_w; %Número de Prandtl para el agua"
Nu_wf=0.023*Re_wf^0.8*Pr_w^0.4; %Número de Nusselt del agua"

h_wf=(Nu_wf*K_w)/D_int_rf; %Coeficiente convectivo entre el receptor y
el fluido"

T_r1=(T_o+273.15)+((I_b*(ETA_of/100)*A_af)/h_wf);
T_r=T_r1-273;

hr=4*SB*e_r*T_r1^3;

U_L= hr+h_af;
Q_u=(I_b*(ETA_o/100)*A_af)-(A_rf*U_L*(T_r-T_a)); %Calor util
entregado por el concentrador parabolico

ETA_f=(Q_u/(I_b*A_af))*100;
fprintf('Registro: T_r=%.2f , T_i=%.4f, T_o=%.4f, ETA_f=%.4f \n', T_r,
T_i, T_o, ETA_f);
data(ki,1)=T_o;
data(ki,2)=ETA_f;
data(ki,3)=Cp_w;
data(ki,4)=d_w;
end
dlmwrite('final.txt',data, ';')

```