



STIRLING: ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNIDADES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES SOLAR TÉRMICA Y GEOTÉRMICA

LUIS HUMBERTO LOZANO PIÑEROS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2009

**STIRLING: ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE LA
IMPLEMENTACIÓN DE UNIDADES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE
FUENTES SOLAR TÉRMICA Y GEOTÉRMICA**

LUIS HUMBERTO LOZANO PIÑEROS

Trabajo de grado presentado para optar al título de
Ingeniero Electricista

Director

Dr. GILBERTO CARRILLO CAICEDO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2009

Dedicatoria

A Dios,

A mi Familia, especialmente

A mi Padre y a mi Madre,

*por todo su apoyo, su
comprensión, su confianza y
todo su cariño,*

*A Carolina, por su apoyo
incondicional, su paciencia y
su Amor.*

Agradecimientos

Deseo agradecer de la manera más especial a mis Padres, gracias a su apoyo he logrado finalizar esta etapa. A mi Hermana por su ayuda con las gráficas.

A Carolina por su constante apoyo y ayuda.

De manera muy especial y sincera deseo agradecer el apoyo del profesor Gilberto Carrillo, el Director de este proyecto, por su orientación y amistad.

A los profesores de la E³T, por sus enseñanzas.

A mis amigos y compañeros de Universidad.

A todas las personas que me acompañaron en este proceso.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	1
1 RADIACIÓN SOLAR.....	6
1.1 EL SOL.....	6
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR: CONSTANTE SOLAR, ESPECTRO DE RADIACIÓN SOLAR Y SU ENERGÍA	9
1.3 ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA DE LA RADIACIÓN SOLAR	12
1.4 INCIDENCIA DEL MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR	14
1.4.1 <i>Distancia Tierra-Sol</i>	14
1.4.2 <i>Declinación del Sol</i>	16
1.4.3 <i>Relaciones Geométricas en el Análisis de la Radiación Solar</i>	21
1.4.3.1 Tiempo Solar Verdadero	21
1.4.3.2 Ángulo Horario (ω).....	22
1.4.3.3 Relaciones Geométricas Observador-Sol	23
1.4.3.4 Carta Solar	25
1.4.4 <i>Variación de la Intensidad de Radiación Solar Extraterrestre</i>	26
1.4.5 <i>Radiación Solar Diaria Fuera de la Atmósfera Terrestre</i>	27
1.5 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN Y EL BRILLO SOLAR.....	28
1.6 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	31
2 ENERGÍA GEOTÉRMICA	32
2.1 CAMPOS GEOTÉRMICOS	33
2.2 USOS DIRECTOS DE LA GEOTERMIA.....	35
2.3 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE MÉTODOS CONVENCIONALES	36
2.3.1 <i>Ciclo con unidades de contrapresión</i>	37
2.3.2 <i>Ciclo con unidades de condensación</i>	37
2.3.3 <i>Ciclo binario</i>	38
2.3.4 <i>Tipo de plantas</i>	39
2.3.4.1 Plantas tipo vapor directo (direct steam).....	39
2.3.4.2 Plantas Tipo Flash-Steam	41

2.3.4.3	Plantas tipo “single flash”	42
2.3.4.4	Plantas tipo “double flash”	43
2.3.4.5	Plantas tipo binario (Binary plants)	44
3	MOTOR STIRLING.....	47
3.1	PARTES PRINCIPALES EN EL PROCESO MOTRIZ.....	48
3.2	ELEMENTOS MECÁNICOS DEL MOTOR <i>STIRLING</i>	50
3.2.1	<i>Tipologías de motores</i>	51
3.2.2	<i>Tipologías de Arquitecturas</i>	52
3.2.2.1	Arquitectura de émbolos de simple acción	52
3.2.2.2	Arquitectura de émbolos de doble acción	55
3.3	FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR <i>STIRLING</i>	55
3.3.1	<i>Ciclo Stirling (Ideal)</i>	55
3.3.2	<i>Motor Stirling Ideal</i>	57
3.4	ANÁLISIS DEL MOTOR <i>STIRLING</i> IDEAL.....	59
3.4.1	<i>Trabajo neto realizado por el motor Stirling ideal</i>	59
3.4.2	<i>Transferencia de calor en un motor Stirling ideal</i>	61
3.4.3	<i>Eficiencia del motor Stirling ideal</i>	62
3.5	ANÁLISIS DEL MOTOR <i>STIRLING</i> REAL.....	63
3.5.1	<i>Evoluciones isotérmicas vs. Evoluciones adiabáticas</i>	64
3.5.2	<i>Análisis de la relación de compresión</i>	66
3.5.3	<i>Análisis del salto térmico</i>	67
3.5.4	<i>Análisis de los fluidos de trabajo</i>	70
3.5.5	<i>Curvas características</i>	70
4	GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL MOTOR <i>STIRLING</i> – ENERGÍA SOLAR	76
4.1	SISTEMA DISCO- <i>STIRLING</i>	76
4.1.1	<i>Partes principales de un sistema disco-Stirling</i>	76
4.1.1.1	Concentrador solar.....	78
4.1.1.2	Sistema de seguimiento	80
4.1.1.3	Receptor.....	81
4.2	DESARROLLO Y ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DISCO- <i>STIRLING</i>	84
4.2.1	<i>Sistema Distal de la Plataforma Solar de Almería</i>	84
4.2.1.1	Distal I	84
4.2.1.2	Distal II	85

4.2.2	<i>Sistema Vanguard de Advanco</i>	86
4.2.3	<i>Sistema SBP en Arabia Saudita</i>	87
4.2.4	<i>Sistemas CPG</i>	88
4.2.4.1	Sistema CPG de 7 kWe	88
4.2.4.2	Sistema CPG de 25 kWe	89
4.2.5	<i>Sistema SAIC</i>	89
4.2.6	<i>Sistema EURODISH™</i>	93
4.2.7	<i>Sistema SUNCATCHER™</i>	96
4.3	TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR (CSP)	103
4.3.1	<i>Sistemas de Receptor Central o Torre Solar</i>	103
4.3.2	<i>Reflectores Lineales de Fresnel</i>	105
4.4	COMPARACIÓN DEL SISTEMA DISCO-STIRLING CON OTRAS TECNOLOGÍAS SOLARES DE CONCENTRACIÓN (CSP)	106
5	EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL SISTEMA DISCO-STIRLING EN COLOMBIA	112
5.1	RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA Y LOCALIZACIÓN DE UN PROYECTO DE GENERACIÓN	112
5.2	CONSIDERACIONES TÉCNICAS	115
5.3	CONSIDERACIONES ECONÓMICAS	116
6	GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL MOTOR STIRLING – ENERGÍA GEOTÉRMICA ..	117
6.1	MOTOR STIRLING DE BAJO DIFERENCIAL DE TEMPERATURA LDSE	117
6.2	ESTADO DEL ARTE EN MOTORES LDSE	118
6.2.1	<i>Flat Plate LDSE</i>	118
6.2.2	<i>Modelo de la Universidad de Saitama – Japón</i>	120
6.2.2.1	Configuración del motor.	122
6.2.2.2	Acoplamiento mecánico	122
6.2.2.3	Intercambiadores de calor	123
6.2.2.4	Pistón de potencia	125
6.2.2.5	Pistón desplazador	126
7	CONSIDERACIONES TÉCNICO-ECONÓMICAS DEL LDSE A PARTIR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA	127
7.1	ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA	127
7.2	CONSIDERACIONES ECONÓMICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MOTOR LDSE PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	130

7.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA ESTIMADA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN .	
.....	132
CONCLUSIONES.....	134
BIBLIOGRAFÍA.....	137
ANEXO 1. COMPARACIÓN DE COSTOS DEL SISTEMA DISCO-STIRLING CON OTRAS ENERGÍAS RENOVABLES	
A NIVEL GLOBAL	145

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valor de n para los días del año.....	15
Tabla 2. Instrumentos para la medición de la radiación y el brillo solar.	29
Tabla 3. Clasificación de los recursos geotérmicos de acuerdo a la temperatura.	35
Tabla 4. Usos directos de la Geotermia.....	35
Tabla 5. Diferenciación entre pistón, desplazador y émbolo mixto.....	52
Tabla 6. Calor aportado en función del tipo de transformación.....	66
Tabla 7. Constantes particulares para una variedad de gases a 300 °K.	70
Tabla 8. Número de Beale según la temperatura del calentador.	71
Tabla 9. Ficha Técnica para el sistema SAIC/STM.	91
Tabla 10. Eficiencia de los procesos en una unidad SAIC/STM de segunda generación.....	92
Tabla 11. Ficha Técnica para un sistema EuroDISH™.	94
Tabla 12. Ficha Técnica para una unidad SunCatcher de SES.	99
Tabla 13. Eficiencia de los procesos en una unidad SunCatcher de SES.	100
Tabla 14. Desempeño Energético de la unidad SunCatcher de SES.....	101
Tabla 15. Comparación entre las tecnologías de concentración solar (CSP).	109
Tabla 16. Comparación de las aplicaciones, ventajas y desventajas de las principales tecnologías CSP.....	110
Tabla 17. Cantidad Estimada de Energía Producida Anual para la ubicación del proyecto sugerida.	116
Tabla 18. Costos de las tecnologías solares térmicas.....	116
Tabla 19. Principales aspectos del motor de la Universidad de Saitama.....	120
Tabla 20. Especificaciones de los Intercambiadores de Calor del motor <i>Stirling</i> de 300 W de la Universidad de Saitama.	124

Tabla 21. Localización y características de las principales fuentes geotérmicas en Colombia.....	129
Tabla 22. Utilización de Energía Geotérmica para Calentamiento Directo.....	130
Tabla 23. Resumen de costos de mantenimiento	132
Tabla 24. Resumen de costos y ahorros del proyecto de generación con energía geotérmica.....	133
Tabla 25. Análisis financiero del proyecto de generación Stirling-energía geotérmica.....	133
Tabla 26. Costos de Inversión, Operación y Mantenimiento para Energías Renovables...	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del Sol.....	7
Figura 2. Distribución espectral de la radiación solar.	10
Figura 3. Atenuación atmosférica de la radiación solar.	14
Figura 4. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol.....	15
Figura 5. Inclinação del eje de rotación de la tierra con respecto al plano de la eclíptica. 17	
Figura 6. Orientación del eje de la Tierra con relación al plano de la eclíptica durante el año.....	18
Figura 7. Declinación del Sol.....	19
Figura 8. Esquema del cambio de declinación del Sol con respecto al plano del Ecuador.. 19	
Figura 9. Declinación solar en el transcurso del año.....	20
Figura 10. Trayectorias solares para diferentes latitudes y épocas del año	21
Figura 11. Ángulo Horario.....	22
Figura 12. Dirección del haz de radiación solar directa.	23
Figura 13. Tipos de carta solar.....	25
Figura 14. Variación de la radiación solar afuera de la atmósfera terrestre	27
Figura 15. Radiación diaria sobre una superficie horizontal y paralela a la superficie terrestre fuera de la atmósfera.....	28
Figura 16. Modelo de un campo geotérmico con una planta de generación convencional instalada.	33
Figura 17. Diagrama simplificado planta tipo vapor directo.....	40
Figura 18. Diagrama de planta tipo <i>single flash</i>	43
Figura 19. Diagrama de planta tipo <i>double flash</i>	44
Figura 20. Diagrama simplificado de planta tipo binario (binary plants).....	45

Figura 21. Diagrama de bloques de las principales partes de una máquina <i>Stirling</i> usada como motor	49
Figura 22. Posible configuración de un motor <i>Stirling</i> real.....	50
Figura 23. Motores <i>Stirling</i> tipo α (de simple acción y doble pistón).	52
Figura 24. Motores <i>Stirling</i> tipo β (de simple acción con pistón y desplazador en cilindro único).....	53
Figura 25. Motores <i>Stirling</i> tipo γ de simple acción con pistón y desplazador en doble cilindro.....	54
Figura 26. Motor <i>Stirling</i> de simple acción con pistón y desplazador líquidos.....	54
Figura 27. Motores <i>Stirling</i> de doble acción.....	55
Figura 28. Diagramas P/V y T/S del ciclo <i>Stirling</i>	56
Figura 29. Evoluciones termodinámicas del motor <i>Stirling</i> ideal en una configuración β ... 57	
Figura 30. Posibles transformaciones para la expansión de 1 a 2.	64
Figura 31. Rendimiento en función de la relación de compresión en el ciclo <i>Stirling</i>	68
Figura 32. Trabajo neto en función de la relación de compresión en el ciclo <i>Stirling</i>	68
Figura 33. Rendimiento en función del salto térmico para diferentes temperaturas de la fuente fría.	69
Figura 34. Trabajo en función del salto térmico para diferentes temperaturas de la fuente fría.....	69
Figura 35. Influencia de los principales parámetros de funcionamiento sobre las prestaciones del motor.	73
Figura 36. Influencia de algunos parámetros de diseño sobre la potencia del motor, a una velocidad y una presión determinada.	74
Figura 37. Estructura de un sistema Disco- <i>Stirling</i>	78
Figura 38. Funcionamiento de un concentrador solar.	79
Figura 39. Concentrador parabólico usado en el sistema <i>EURODISH</i>	80
Figura 40. Sistema seguidor de Sol del sistema <i>EuroDISH</i>	81
Figura 41. Receptor Solar para el motor <i>Stirling</i> SBP/SOLO V-160/161.	82

Figura 42. Funcionamiento de un receptor híbrido.	83
Figura 43. Receptor Híbrido de tubería caliente.	83
Figura 44. Un sistema DISTAL I en operación en la Plataforma Solar de Almería.....	85
Figura 45. Unidad DISTAL II ubicada en la Plataforma Solar de Almería.	86
Figura 46. El Sistema Vanguard de Advanco.	86
Figura 47. Disco- <i>Stirling</i> de 50 kWe en Arabia Saudita (Villa solar).	87
Figura 48. Sistema CPG de 7 kWe.....	88
Figura 49. Sistema CPG de 25 kWe.....	89
Figura 50. Sistema Disco- <i>Stirling</i> de SAIC/STM de segunda generación en Golden, Colorado.	90
Figura 51. Esquema de un motor STM 4-120.....	91
Figura 52. Sistema EuroDISH™ en la plataforma solar de Almería vista desde adelante y desde atrás.	94
Figura 53. Motor <i>Stirling</i> SOLO V161 con receptor solar únicamente.....	95
Figura 54. Unidad Disco- <i>Stirling</i> de <i>Stirling Energy Systems</i> (SES), y sus principales componentes.....	97
Figura 55. PCU usado en el SunCatcher con el Motor <i>Stirling</i> Kockums 4-95.)	98
Figura 56. Esquema del Motor <i>Stirling</i> Kockums 4-95 o Mark II.....	98
Figura 57. Sistema Optimizado del SunCatcher de SES.....	102
Figura 58. Esquema de un sistema de receptor central y sistema <i>Solar One</i>	104
Figura 59. Sistema cilindro-parabólico.	105
Figura 60. Esquema del sistema de reflectores lineales de Fresnel.....	106
Figura 61. Sistema lineal de Fresnel en la Plataforma Solar de Almería.	106
Figura 62. Cantidad de agua requerida en las tecnologías CSP.	108
Figura 63. Mapa del promedio multianual de radiación solar global de Colombia en kWh/m ²	113
Figura 64. Mapa del promedio multianual de brillo solar de Colombia en horas.	114
Figura 65. Posible localización del proyecto de generación disco- <i>Stirling</i>	115

Figura 66. Motor <i>Stirling</i> de Bajo Diferencial de Temperatura "Flat Plate" de Ivo Kolin...	119
Figura 67. LDSE de 300 W de la Universidad de Saitama en Japón.	121
Figura 68. Vista esquemática del LDSE de 300 W de la Universidad de Saitama.	121
Figura 69. Configuración Gamma usada en el motor <i>Stirling</i> de la Universidad de Saitama	122
Figura 70. Acoplamiento Mecánico del Motor al cigüeñal tipo Scotch.	123
Figura 71. Radiador tubular con aletas usado como intercambiador de calor.....	123
Figura 72. Fondo del motor <i>Stirling</i> de 300 W de la Universidad de Saitama y ubicación de los intercambiadores.	125
Figura 73. Pistón de potencia del motor <i>Stirling</i> de 300 W de la Universidad de Saitama.	125
Figura 74. Pistón desplazador de la máquina de 300 W de la Universidad de Saitama. ...	126
Figura 75. Mapa de Desarrollos Geotérmicos.....	128

RESUMEN

TÍTULO: *STIRLING: ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNIDADES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES SOLAR TÉRMICA Y GEOTÉRMICA**

AUTOR: LUIS HUMBERTO LOZANO PIÑEROS[†]

PALABRAS CLAVE: Motor *Stirling*, energía solar, energía geotérmica.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo de grado se presentan las tecnologías usadas en la generación de energía eléctrica usando el motor *Stirling* a partir de la energía solar térmica y geotérmica. El propósito del trabajo es mostrar al motor *Stirling* como una alternativa de solución a los requerimientos energéticos del planeta.

Se realizó un estudio de las fuentes energéticas usadas (solar y geotérmica) con el objeto de obtener la información necesaria concerniente al funcionamiento de las tecnologías. Así como una presentación del motor *Stirling*, su historia, su estructura y las características de su funcionamiento. A continuación se presentó la tecnología Disco-*Stirling*, que es la usada para la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar térmica, se hace un recorrido por su historia y se presenta el estado del arte de ésta, además se presentan sus características técnicas y algunas estimaciones de tipo económico. También se presentó el motor *Stirling* de bajo diferencial de temperatura – LDSE, el cual se usa en la generación de electricidad a partir de la energía geotérmica, se muestra el estado del arte, la estructura y las principales características técnicas del motor.

Finalmente se realizó un estudio de los recursos energéticos en el país y se presentó una sugerencia para la localización de proyectos de generación basados en éstas tecnologías, llegando así a la conclusión de la factibilidad y la necesidad de la implementación de éstas tecnologías en el país, y de esta forma aprovechar la gran cantidad de recursos renovables con los que cuenta el país. Este trabajo de grado incentiva la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de generación de energía que sean ambiental y económicamente sostenibles.

* Trabajo de Grado

[†] Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo.

ABSTRACT

TITLE: *STIRLING: TECHNO-ECONOMIC STUDY TO DETERMINE THE FEASIBILITY OF IMPLEMENTATION OF ELECTRIC GENERATION UNITS FROM SOLAR THERMAL AND GEOTHERMAL SOURCES*[‡]

AUTHOR: LUIS HUMBERTO LOZANO PIÑEROS[§]

INDEX TERMS: Stirling engine, solar energy, geothermal energy

DESCRIPTION:

This book presents the technologies used for the electric energy generation using the Stirling engine from solar thermal energy and geothermal energy. The purpose of this project is to show the Stirling engine as an alternative solution to the world's energy requirements.

It has been done a study of the proposed energetic sources (solar and geothermal) with the purpose to obtain the necessary information concerning to the technology's functioning. As well, a Stirling engine presentation has been done, its history, structure and operation characteristics. Next, the Dish-Stirling technology has been introduced, which is the technology used for the electric energy production from solar thermal energy, a history path is presented as well as the state of the art of such technology, besides, a technical approach and some economic estimation has been made. Also, it has been presented the low temperature differential Stirling engine - LDSE, which is used for the electricity production from geothermal energy, it's been shown the state of the art, its structure and the main technical characteristics of the engine.

Finally, a study of the country's energetic resources was made and a location for generation projects based on these technologies was suggested, getting in to the conclusion of feasibility and the need of implementation of these technologies in the country, and thereby take advantage of the great quantity of renewable resources available in the nation. This degree thesis encourages the development and research of new energy generation, environmentally and economically sustainable technologies.

[‡] Degree thesis

[§] Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications Engineering School. Direction: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo.

INTRODUCCIÓN

Las fuentes energéticas usadas por el hombre no han cambiado mucho en los últimos años. Si se hace un recorrido por éstas, se encuentra al carbón, el petróleo, el gas, la energía hidráulica, la energía solar, la energía eólica, la biomasa, la energía geotérmica, y más recientemente se encuentra a la energía nuclear y la celda de combustible. Así pues, no se espera un gran descubrimiento que cambie radicalmente el panorama energético. Los esfuerzos a lo largo de los años se han encaminado primordialmente, al desarrollo tecnológico y eficiente en el uso de las fuentes energéticas. Éste dependerá en gran forma del factor social, político y en mayor medida del factor ambiental, siendo factor determinante la competitividad de las fuentes en el mercado energético. De aquí la importancia en el desarrollo tecnológico e investigación en éstas fuentes renovables y limpias de energía. Deben desarrollarse formas más eficientes y económicas para su aprovechamiento, de manera que en el futuro sean consideradas las principales alternativas energéticas a nivel mundial.

El debate energético no sólo está compuesto por el inminente agotamiento de los recursos fósiles y la insuficiencia en las medidas para contrarrestar el efecto invernadero y el calentamiento global, sino como lo enmarca el consejo mundial de energía: “En realidad, la verdadera preocupación de todos los pueblos, y el objetivo final de la sostenibilidad energética, será poder conseguir una energía accesible, disponible y aceptable. La accesibilidad va a estar muy ligada a una adecuada política de precios; la disponibilidad, a la calidad de la energía en el corto plazo y a la seguridad de suministro en el largo plazo; la aceptabilidad, a los objetivos medioambientales y a las sensibilidades públicas”(1).

En Europa, se plantea el debate energético en el sentido de los desafíos tecnológicos para responder a estos objetivos y en concreto, a las necesidades derivadas de las líneas maestras y que se pueden enunciar como:

- “Garantía de seguridad de suministro y diversificación de fuentes energéticas.
- Protección del medio ambiente.
- Competitividad económica.”(2)

En Colombia, se proclamó la ley 697 de 2001, mediante la cual se pretende fomentar el uso racional y eficiente de la energía, y la utilización de energías alternativas. Las directrices de esta ley no son muy distintas de las europeas, ya que en su primer artículo dicta: “Declárase el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales”(3)

La diversidad de recursos energéticos existentes en Colombia le ha permitido al país aprovechar parte de este potencial – especialmente hídrico – para solucionar sus necesidades de energía eléctrica, principalmente a partir del desarrollo de proyectos basados en el uso de tecnologías convencionales, usando principalmente las plantas hidroeléctricas con una capacidad instalada aproximada de 8 561 MW (4), y en menor grado las plantas termoeléctricas con una capacidad instalada aproximada de 4 262 MW (4). Aunque el país dispone de buena cantidad de recurso hídrico, y de buenas reservas de carbón y gas, la disponibilidad de los recursos en el largo plazo puede estar influenciada por cambios climáticos severos y/o variabilidad de precios en los combustibles; siendo esta una de las razones para implementar tecnologías que usen energías renovables alternativas.

Por otro lado, se tiene el problema en el manejo ambiental y la importancia que ha adquirido en los últimos años, ya que el sector energético es uno de los que tiene mayor relación con el medio ambiente. Es necesario pensar en los efectos que el sector energético tiene y ha tenido sobre algunos aspectos medioambientales para tratar de contrarrestarlos. Algunos de estos aspectos se pueden enumerar así:

- Efecto invernadero y calentamiento global
- Diversidad biológica y suelo cultivable
- Calidad del aire y de las aguas
- Gestión de residuos industriales y residenciales

Es así como se plantean nuevamente las energías renovables como una respuesta al debate energético. Esta vez relacionada con la problemática ambiental; debido a que estas en general presentan o una muy baja emisión de partículas contaminantes o cero emisiones, no requieren de áreas que alteren de manera drásticas los ecosistemas y algunas tecnologías permiten obtener energía y otros productos muy provechosos de muchos de los residuos industriales y residenciales, que de otra manera sólo serían contaminantes.

Otra de las razones para implementar el uso de energías alternativas es la dificultad de acceso a ciertas zonas del territorio nacional mediante el sistema interconectado nacional (SIN), denominadas zonas no interconectadas (ZNI), siendo urgente la identificación de las fuentes propensas a ser usadas con alguna de las tecnologías alternativas o convencionales existentes, siempre que éstas tengan un carácter ambientalmente sostenible.

A pesar de que las energías a partir de fuentes renovables parecen ser la respuesta al problema energético, aún poseen ciertos inconvenientes, uno de ellos es la baja eficiencia lograda en algunas de estas tecnologías, cuestión que está siendo reevaluada constantemente para lograr así un mejor rendimiento. Otro de los inconvenientes es el

alto costo de inversión inicial de algunas de estas tecnologías. Sin embargo con el paso del tiempo, la mejoría en las tecnologías y la masificación de su uso, se espera que estos inconvenientes se conviertan en ventajas (eficiencia y economía).

Como se ha venido planteando, una de las respuestas a los problemas energéticos y ambientales producidos por el uso de los combustibles fósiles, es la investigación y el desarrollo de fuentes de energía renovable. Ahora bien, teniendo en cuenta el desarrollo que han tenido las tecnologías no convencionales para la generación de energía eléctrica y la necesidad de construir soluciones energéticas ambientalmente sostenibles, en el país se viene adelantando un proceso encaminado a la identificación y el desarrollo de nuevas alternativas de generación basadas en la utilización de fuentes renovables de energía.

El propósito de este trabajo de grado es presentar una tecnología que debido a que puede ser usada a partir de fuentes renovables, se considera como una tecnología energética alternativa. El *Motor Stirling* se presenta como una opción para la utilización de fuentes de energía renovable en el proceso de generación de electricidad, ya que su principio de funcionamiento precisa de una fuente de calor directa o indirecta y un sumidero o radiador de calor, es decir, requiere de un diferencial de temperatura en dos puntos específicos, razón por la cual puede ser usada por una gran cantidad de energías renovables o de productos secundarios que sean limpios en la generación de calor. En este trabajo de grado se van a considerar dos energías de tipo renovable; la energía solar térmica que es consecuencia de la radiación solar directa y la energía geotérmica como fuentes generadoras de calor. El propósito general del proyecto es poder determinar la factibilidad de la implementación de este tipo de generación.

En el capítulo 1 se tratan los aspectos básicos de la energía solar, y se hace especial énfasis a los aspectos relacionados con la radiación solar destinada a procesos térmicos (radiación directa). En el capítulo 2 se presenta un recorrido sobre los aspectos básicos de la energía geotérmica y las formas convencionales de generación con esta fuente energética. En el capítulo 3 se presenta la teoría básica para comprender el funcionamiento del motor

Stirling, así como algunos de los parámetros que afectan su comportamiento. En el capítulo 4 se presenta la tecnología usada en la generación de energía usando el motor *Stirling*, su descripción, el estado del arte y una comparación con otras tecnologías solares. En el capítulo 5 se presenta un estudio sobre la radiación y brillo solar en el país, así como algunas consideraciones técnicas y económicas con el objetivo de sugerir una ubicación apta para la implementación de una unidad de generación a partir de energía solar y motor *Stirling*. En el capítulo 6 se presenta la tecnología usada en la generación de energía eléctrica usando el motor *Stirling* y en el capítulo 7 se presenta un estudio sobre la energía geotérmica en Colombia y algunas consideraciones técnicas y económicas para su implementación en el país.

1 RADIACIÓN SOLAR¹

La estructura y características del Sol determinan la naturaleza de la energía que este irradia al espacio. En este capítulo se presenta un estudio sobre la naturaleza de esta energía, su intensidad y su distribución espectral; también se presenta la incidencia de la geometría solar en aplicaciones térmicas así como la medición de la radiación y por último se presenta una sugerencia sobre una ubicación apta para la implementación de una unidad de generación con motor *Stirling* a partir de la energía solar basada en un estudio realizado por la Unidad de Planeación Minero-Energética UPME y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

1.1 EL SOL

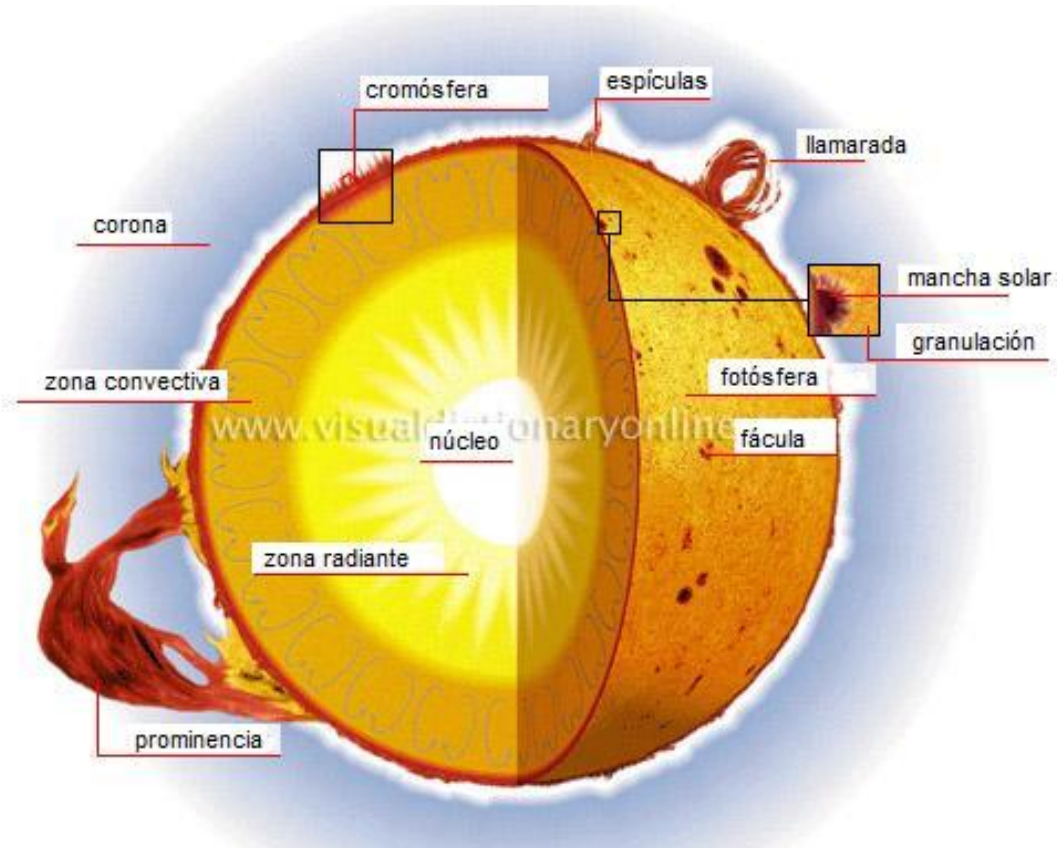
El Sol es una esfera de materia gaseosa extremadamente caliente (lo que se conoce como plasma) con una masa aproximada de $1,9891 \cdot 10^{30}$ kg, con un diámetro de $1,392 \cdot 10^9$ m y está, en promedio, a $1,4946 \cdot 10^{11}$ m de la Tierra. (5)

El Sol se encuentra constituido principalmente por átomos de hidrógeno, el segundo elemento más encontrado es el helio, y casi el resto de la materia está constituida por átomos de otros siete elementos. Se calcula que por cada millón de átomos de hidrógeno en el Sol, hay 98000 átomos de helio, 850 de oxígeno, 360 de carbono, 120 de neón, 110 de nitrógeno, 40 de magnesio, 35 de hierro y 35 de silicio. Así, un 94% de los átomos son de hidrógeno, el 5,9% son de helio y el 0,1% son del resto de elementos. Sin embargo el hidrógeno es el más liviano de todos los elementos, y así cuenta con el 72% de la masa, el helio tiene el 26% y el 2% restante en otros elementos que sirven como catalizadores en las reacciones termonucleares de fusión.(6)

¹ Radiación solar se define como la energía emitida por el Sol que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y partículas

En la Figura 1 se observa el modelo actual para la estructura del Sol, el cual explica satisfactoriamente la mayoría de fenómenos observados. Según este modelo, el Sol está compuesto por capas², estas son:

Figura 1. Estructura del Sol. Tomado de: (7)



- **Núcleo**: Temperaturas entre los 12 000 000 y 15 000 000 K y una densidad de 150 000 kg/m³. Es el lugar donde se originan las reacciones termonucleares.
- **Zona radiante**: La temperatura cae hasta 130 000 K en el límite con la zona convectiva, la densidad allí es de 70 kg/m³. Es la zona exterior al núcleo, el transporte de la energía generada en el interior se produce por radiación hasta el límite exterior de la zona radiativa. Esta zona está compuesta de plasma, es decir,

² La información sobre la estructura solar está tomada de las referencias (5), (6), (10)

grandes cantidades de hidrógeno y helio ionizado. Debido a la caída en la temperatura hacia el exterior es más fácil para los fotones viajar hacia el exterior, sin embargo durante su recorrido son absorbidos y re emitidos ininidad de veces.

- **Zona convectiva:** La temperatura cae hasta unos 5 000 K y una densidad de aproximadamente 10^{-5} kg/m³ en el límite con la fotosfera. Esta región se extiende por encima de la zona radiativa y en ella los gases solares dejan de estar ionizados y los fotones son absorbidos con facilidad volviéndose el material opaco al transporte de radiación. Por lo tanto, el transporte de energía se realiza por convección, de modo que el calor se transporta de manera no homogénea y turbulenta por el propio fluido.
- **Fotosfera:** La fotosfera se considera como la superficie solar. Puesto que el Sol es gaseoso, su fotosfera es algo transparente, puede ser observada hasta una profundidad de unos cientos de kilómetros antes de volverse completamente opaca. Normalmente se considera que la fotosfera solar tiene unos 100 o 200 km de profundidad. Los gases de que está compuesta están fuertemente ionizados y son capaces de absorber y emitir una continua radiación espectral. Es la fuente de la mayoría de la radiación solar.
- **Cromósfera:** Es una capa gaseosa exterior a la fotosfera visualmente mucho más transparente, con temperaturas un poco mayores que en la fotosfera (> 5 000 K) pero con menor densidad.
- **Corona:** La corona solar está formada por las capas más tenues de la atmósfera superior solar. Región de muy baja densidad y una alta temperatura (10^6 K).

Al Sol se le considera tener una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5 777 K.³ Sin embargo, la estructura solar presentada, sus gradientes de temperatura y densidad, sirven como base para la apreciación de que el Sol, en efecto, no funciona como un radiador de

³ La temperatura efectiva de cuerpo negro de 5 777 K se refiere a la temperatura de un cuerpo negro que irradia la misma cantidad de energía que el Sol.

cuerpo negro a temperatura constante. Por el contrario, la radiación emitida por el Sol es el resultado de la emisión y absorción de radiación de varias longitudes de onda a través de las capas.

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR: CONSTANTE SOLAR, ESPECTRO DE RADIACIÓN SOLAR Y SU ENERGÍA

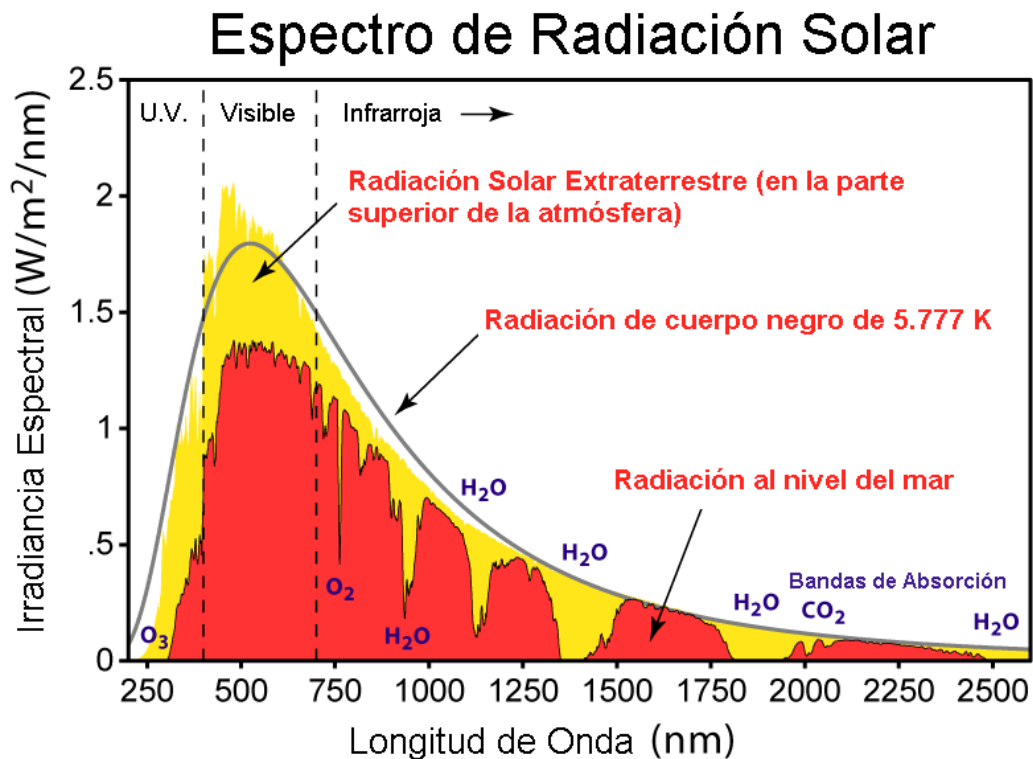
El núcleo ocupa unos 139 000 km del radio solar, 0,2 del mismo, tiene una densidad de hasta 150 000 kg/m³ (150 veces la densidad del agua en la Tierra) y una temperatura cercana a los 13 600 000 K (en contraste, la superficie del Sol tiene una temperatura aproximada de 5 800 K) (8). Es en esta zona donde se originan las reacciones termonucleares de fusión que proporcionan toda la energía que el Sol produce. La fusión consiste en la transformación del hidrógeno solar en helio mediante un proceso llamado *cadena protón-protón*. En estas reacciones de fusión hay una pérdida de masa, es decir, el hidrógeno consumido pesa más que el helio producido (la fusión de 4 protones de hidrógeno resulta en un núcleo de helio). Esa diferencia de masa se transforma en energía según la ecuación de Einstein ($E = mc^2$), donde E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz. “Aproximadamente unos $3,4 \cdot 10^{38}$ protones de hidrógeno son convertidos en núcleos de helio cada segundo, liberando energía a una tasa de 4,26 millones de toneladas por segundo” (8), que irradian aproximadamente $3,96 \cdot 10^{26}$ W.

Esta energía, en el núcleo, se manifiesta en forma de rayos gamma (γ) y rayos X, esta radiación viaja hasta la superficie solar interactuando con la materia solar mediante una sucesión de procesos de radiación y convección con sucesivos procesos de emisión, absorción y re radiación o re emisión, transformándose así en varios tipos de radiación, desde la menos energética hasta la más energética éstas son: ondas de radio, rayos infrarrojos (IR), luz visible (V o LV), rayos ultravioleta (UV), rayos X y rayos gamma (γ). El Sol emite al espacio esta energía en forma de radiación electromagnética (6),(9),(10).

La tasa de radiación electromagnética solar recibida por unidad de área (Irradiancia) en la parte externa de la atmósfera de la Tierra, se conoce como *Constante Solar (I_0)* (6).

También se define como la energía recibida del Sol, por unidad de tiempo en un área de superficie perpendicular a la dirección de la propagación de la radiación, a la distancia media entre el Sol y la Tierra, en la parte superior de la atmósfera. Esta tiene un valor estimado $I_0 = 1\,367\text{ W/m}^2$ con una incertidumbre del orden del 1% (10), pero sólo una cantidad aproximada del 40 % de la energía en esta radiación alcanza la superficie de la Tierra. La atmósfera bloquea una cantidad de la radiación visible e infrarroja, casi todos los rayos UV, y todos los rayos X y gamma (γ), sin embargo, casi toda la energía de las ondas de radio llega a la superficie terrestre.

Figura 2. Distribución espectral de la radiación solar. Tomado de: (11)



En la Figura 2 se observa el espectro de la radiación solar extraterrestre, la radiación equivalente de cuerpo negro para una temperatura de 5 777 K de la radiación solar extraterrestre y la radiación al nivel del mar. El área bajo la curva correspondiente a la radiación solar extraterrestre y a la curva equivalente de cuerpo negro es igual a la constante solar, es decir es igual a $I_0 = 1\,367\text{ W/m}^2$.

Para entender la energía de las radiaciones solares se debe distinguir dos conceptos: los cuantos de energía asociados a cada longitud de onda; y la densidad de los mismos por longitud de onda, esto es, la intensidad espectral de la radiación, la cual se determina a partir de la figura de la distribución espectral de la radiación (12). Según la teoría de Max Planck, las ondas electromagnéticas transportan una cantidad bien definida de energía dada por:

$$E = h * f = h * \frac{c}{\lambda}$$

Ecuación 1

Donde:

- h es la constante de Planck ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J*s)
- f es la frecuencia de la radiación en Hz
- c es la velocidad de la luz en el vacío ($3 \cdot 10^8$ m/s)
- λ es la longitud de onda en metros
- E es la energía en Joule. Esta es la energía de un cuanto de energía o un fotón para una longitud de onda determinada.

De esta forma, y con la ayuda de la distribución espectral (para hallar la densidad) es posible calcular la energía radiada por el Sol en la parte superior de la atmósfera.

En la Figura 2 se pueden distinguir tres regiones:

1. La región ultravioleta (U.V.): $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$
2. La región visible: $0,38 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$
3. La región infrarroja: $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$

A cada región le corresponde una fracción de la energía total incidente en la parte superior de la atmósfera, distribuida así: 7% a la ultravioleta, 47,3% a la visible y 45,7% a la infrarroja (13).

1.3 ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA DE LA RADIACIÓN SOLAR

La intensidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre no es la misma que la recibida en el exterior de la atmósfera, ya que esta se ve disminuida o atenuada a lo largo de su recorrido por la atmósfera terrestre. Una aproximación de la cantidad de energía incidente en la Tierra y de cómo se transforma en la atmósfera y la superficie terrestre se puede establecer de la siguiente manera: Si la tierra se asume de forma perfectamente esférica, tiene un plano diametral πr^2 , donde r es el radio medio de la tierra, la radiación solar interceptada está entonces a una tasa de $1367\pi r^2$ W, si el radio r está en metros, se calcula aproximadamente que equivale a $6,324 \cdot 10^6$ m, entonces la tasa de radiación solar resulta en:

$$\text{Tasa de radiación terrestre} = 1367 * \pi * (6,324 * 10^6)^2$$

$$\text{Tasa de radiación terrestre} = 1,7175 * 10^{17} \text{ W} = 1,7175 * 10^{17} \text{ J/s}$$

Ecuación 2. Tasa de Radiación Solar sobre la Tierra

De la radiación total incidente, $1,7175 \cdot 10^{17}$ W, el 30% es reflejado al espacio exterior. La mayor parte del 70% restante calienta la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos (47%) o se absorbe en la evaporación de agua (23%). Relativamente muy poca energía es usada y dirigida al viento y las olas o para ser absorbida por las plantas en la fotosíntesis. En realidad, prácticamente toda la energía es radiada al espacio exterior en forma de radiación infrarroja.

En el proceso de comprensión de estos procesos se procede a presentar la definición de algunos términos importantes:

- **Masa atmosférica (m):** relación entre la masa del aire a través de la cual la radiación directa pasa para llegar a la superficie terrestre y la masa que pasaría si el sol estuviera ubicado en el cénit.
- **Radiación directa:** es la radiación solar recibida desde el Sol sin haber sido dispersada por la atmósfera, es decir sin haber cambiado su dirección.

- **Radiación difusa:** Es la radiación recibida desde el Sol, luego de haber cambiado su dirección por difusión atmosférica.
- **Radiación reflejada:** Es la radiación recibida, ya sea de tipo directa o difusa, que ha sido reflejada por alguna superficie.
- **Radiación Global:** Es la suma de la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada recibida.

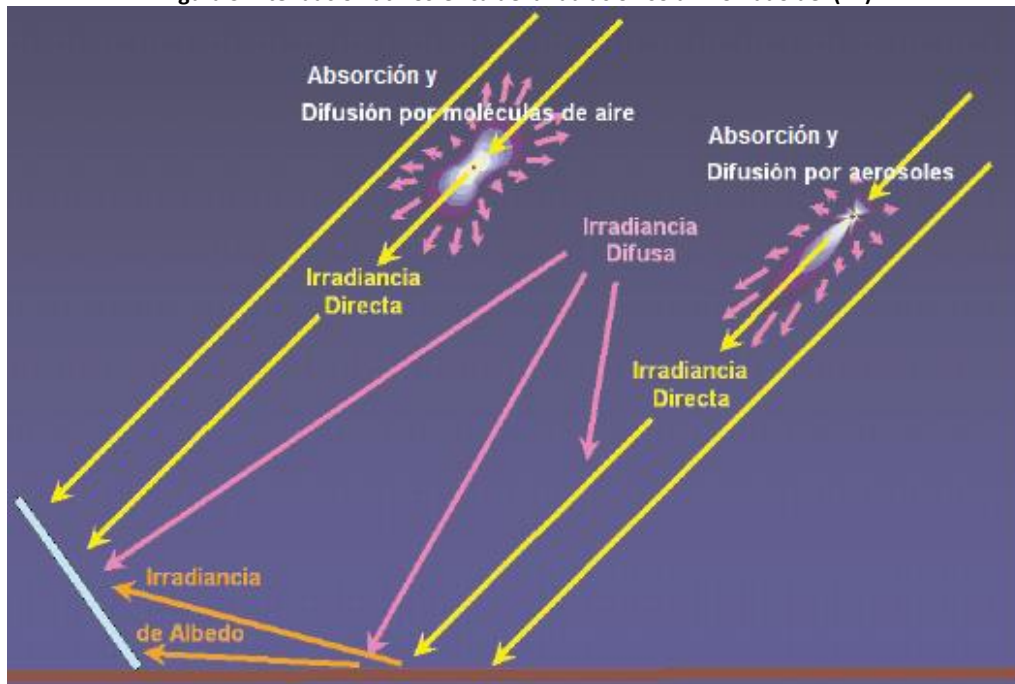
Las instalaciones solares térmicas sin concentración aprovechan las componentes directa, difusa y reflejada de la radiación solar. Las instalaciones de concentración sólo aprovechan la componente directa.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre está atenuada en su intensidad por diversos procesos que se producen a lo largo de su recorrido a través de la atmósfera terrestre. Estos procesos son:

1. Absorción selectiva por gases y por vapor de agua en la atmósfera.
2. Difusión molecular (o de Rayleigh), debida también a los gases y al vapor de agua.
3. Difusión y absorción por aerosoles o turbidez.

Los procesos de atenuación se ilustran en la Figura 3.

Figura 3. Atenuación atmosférica de la radiación solar. Tomado de: (14)



Debido a que los sistemas usados para la implementación de la planta son de concentración, a partir de este punto se enfocará principalmente en la radiación directa.

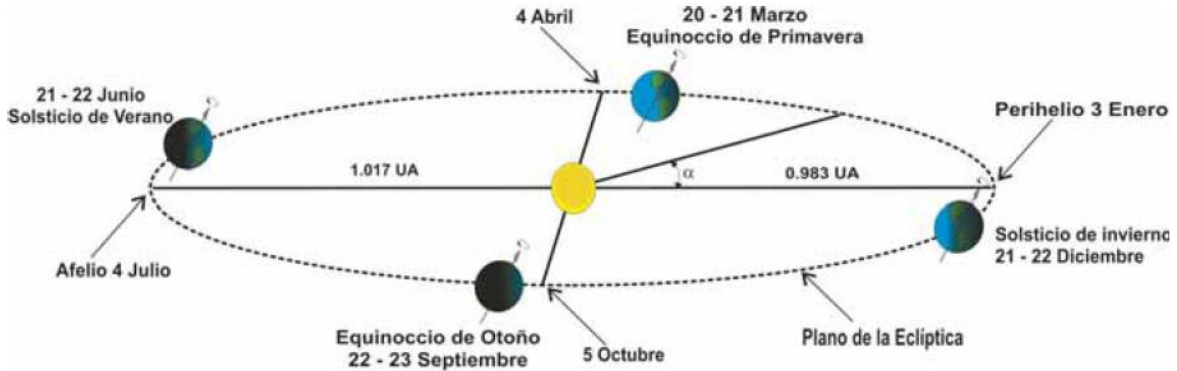
1.4 INCIDENCIA DEL MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar sobre la atmósfera de la Tierra varía inversamente proporcional de acuerdo al cuadrado de la distancia al Sol, y sobre la superficie terrestre es necesario tener también en cuenta algunos aspectos que se estudiarán en esta sección.

1.4.1 Distancia Tierra-Sol

La Tierra en su movimiento alrededor del Sol describe una órbita elíptica en la cual la distancia promedio Tierra-Sol es de aproximadamente $1,4946 \cdot 10^{11}$ m (valor llamado Unidad Astronómica U. A.)

Figura 4. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Tomado de: (13)



Para determinar la distancia del Sol a la Tierra, se puede aproximar mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{a(1 - e^2)}{(1 + e \cos \alpha)}$$

Ecuación 3

Donde:

- R es la distancia Tierra-Sol en el día n según la Tabla 1.
- a es una unidad astronómica
- e es la excentricidad de la órbita terrestre ($e = 0,01673$)
- α es la posición angular de la Tierra sobre la órbita. En radianes está dada por:

$$\alpha = \frac{2\pi(n - 1)}{365} \text{ rad}$$

Ecuación 4

Donde n es el número del día del año según la Tabla 1.

Tabla 1. Valor de n para los días del año

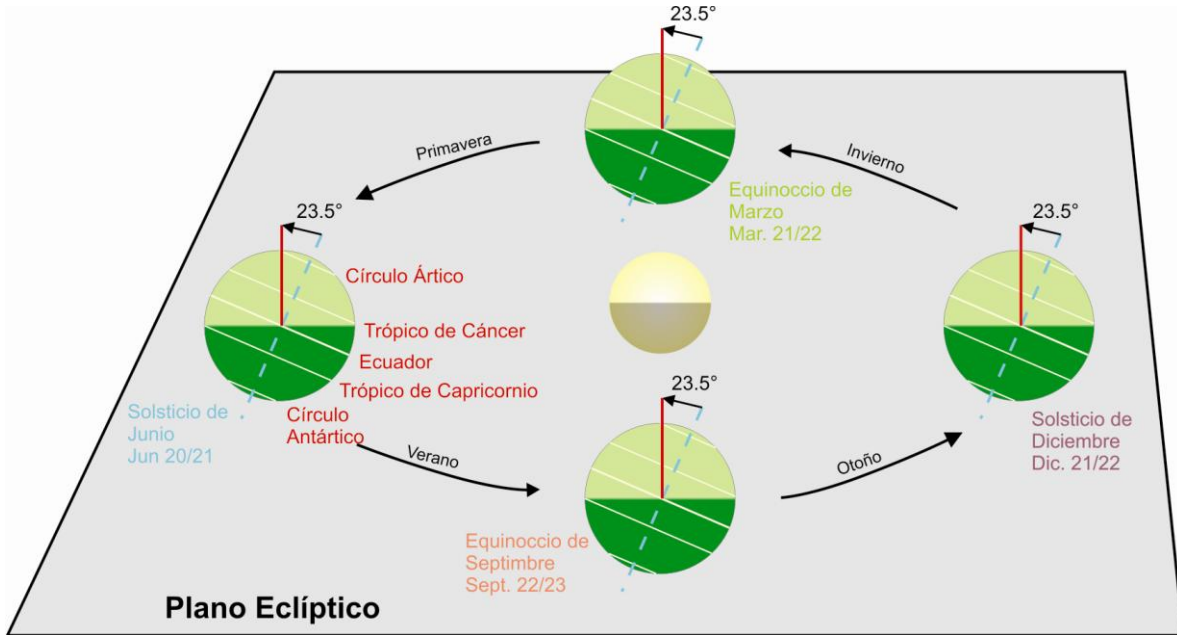
Mes	n para el i -ésimo Día del Mes
Enero	i
Febrero	$31+i$
Marzo	$59+i$

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	$334+i$

1.4.2 Declinación del Sol

El plano de la eclíptica se puede definir como una superficie plana bidimensional que interseca geoméricamente la trayectoria orbital de la Tierra alrededor del Sol. El eje de rotación de la tierra no se encuentra perpendicular a esta superficie sino que está inclinado un ángulo de aproximadamente $23,45^\circ$ de la perpendicular ó a $66,55^\circ$ del plano, tal como se muestra en la Figura 5. La Figura 5 representa una vista lateral de la Tierra en su órbita alrededor del Sol en cuatro importantes fechas: Solsticio de Junio, Equinoccio de Septiembre, Solsticio de Diciembre y Equinoccio de Marzo. En esta figura se observa que el ángulo del eje de rotación de la Tierra no cambia con respecto al plano de la eclíptica, la línea roja representa una línea perpendicular al plano de la eclíptica.

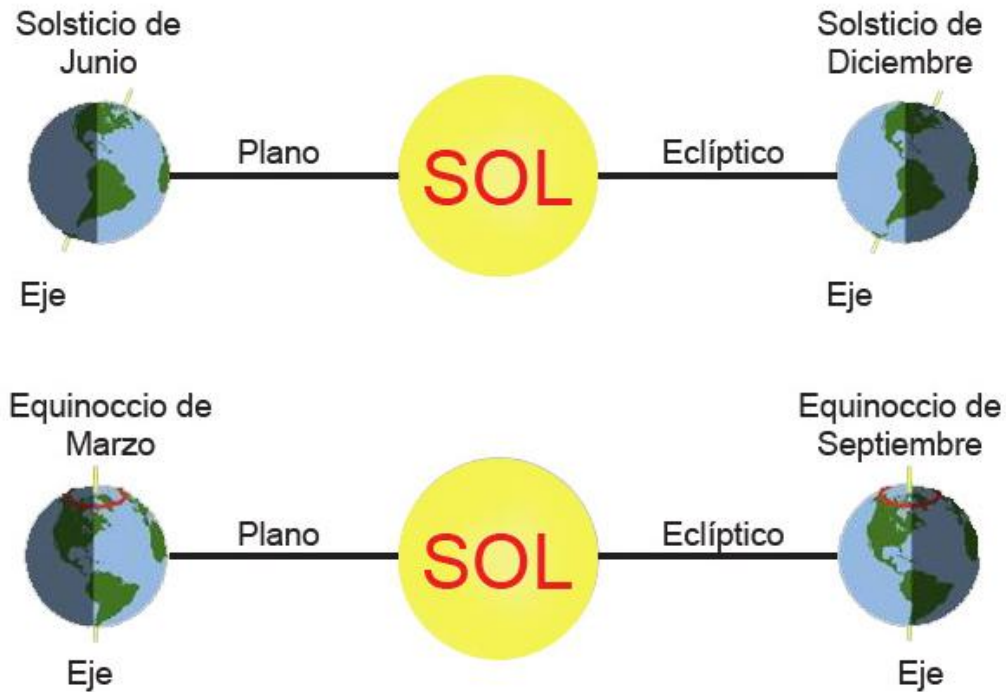
Figura 5. Inclínación del eje de rotación de la tierra con respecto al plano de la eclíptica. Tomado de: (15)



Sin embargo, la posición relativa del eje de la Tierra sí cambia con respecto al Sol durante el ciclo de traslación, tal como se muestra en la Figura 6, donde se observa la orientación del eje de la Tierra para los dos solsticios y los dos equinoccios. Se observa también de la Figura 6 que en los equinoccios el ángulo del círculo de iluminación⁴ con respecto al eje de la Tierra es cero, mientras que en los solsticios este ángulo es máximo con un valor de 23,45°. Este fenómeno es el responsable del cambio anual en la declinación del Sol, la cual, es el causante de las estaciones debido al cambio en la intensidad y duración de la luz solar recibida en los distintos lugares de la tierra.

⁴ El círculo de iluminación se refiere a la superficie plana imaginaria que divide la zona iluminada de la zona oscura de la Tierra

Figura 6. Orientación del eje de la Tierra con relación al plano de la eclíptica durante el año. Adaptado de: (15)



El ángulo formado entre el plano ecuatorial de la Tierra y la línea Tierra-Sol⁵ se denomina declinación solar (δ). Este concepto es mostrado con más claridad en la Figura 7. Ahora bien, teniendo en cuenta que el círculo de iluminación es perpendicular al plano de la eclíptica, la declinación también puede medirse por el ángulo formado por el círculo de iluminación y el eje de la Tierra, como se observa en la Figura 6. Así, entonces, como ya se había mencionado, la declinación solar es cero en los equinoccios y alcanza su valor máximo en los solsticios con un valor de $23,45^\circ$. El signo de la declinación es positivo (+) cuando el Sol incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio norte, entre el 21 de marzo (equinoccio de primavera) y el 23 de septiembre (equinoccio de otoño), y negativo (-) cuando incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio sur, entre el 23 de septiembre (equinoccio de otoño) y el 21 de marzo (equinoccio de primavera)

⁵ La línea Tierra-Sol se refiere a la línea que une el centro de la Tierra sobre el plano ecuatorial y el centro del Sol

Figura 7. Declinación del Sol. Adaptado de: (16)

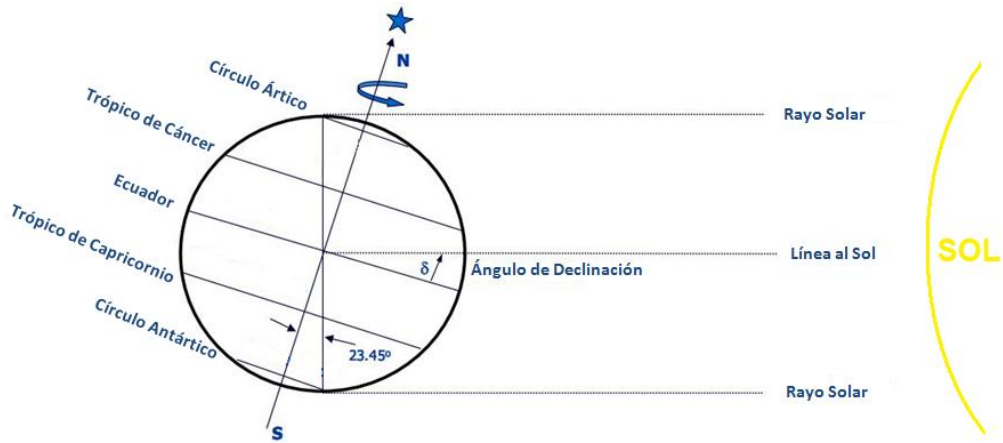
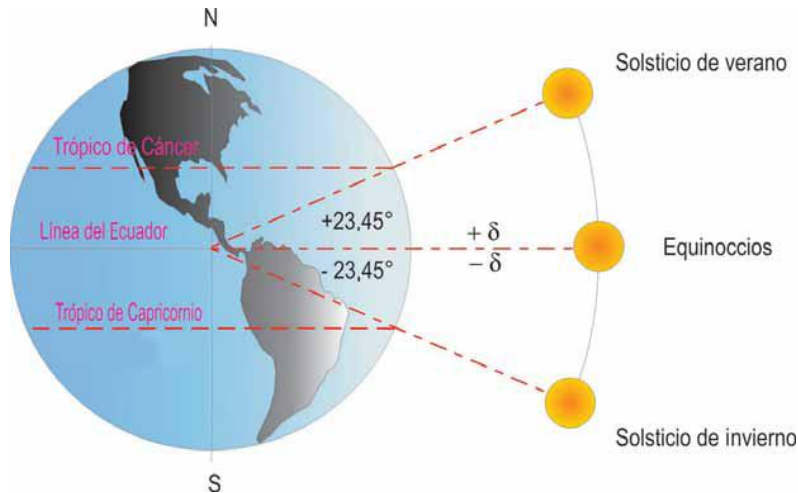


Figura 8. Esquema del cambio de declinación del Sol con respecto al plano del Ecuador. Tomado de: (13)

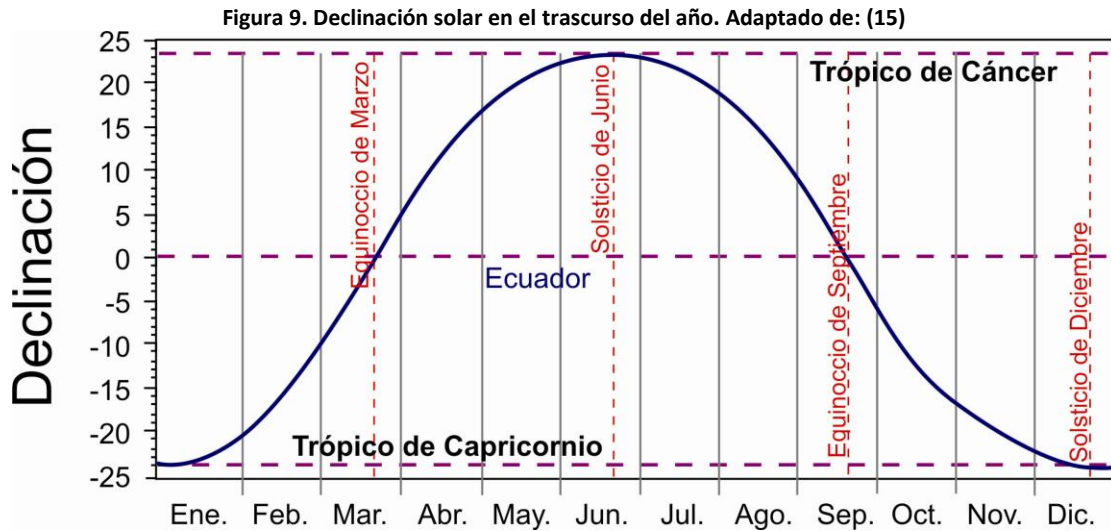


La declinación δ en grados se puede encontrar de la ecuación de Cooper (17):

$$\delta = 23,45 * \text{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right)$$

Ecuación 5

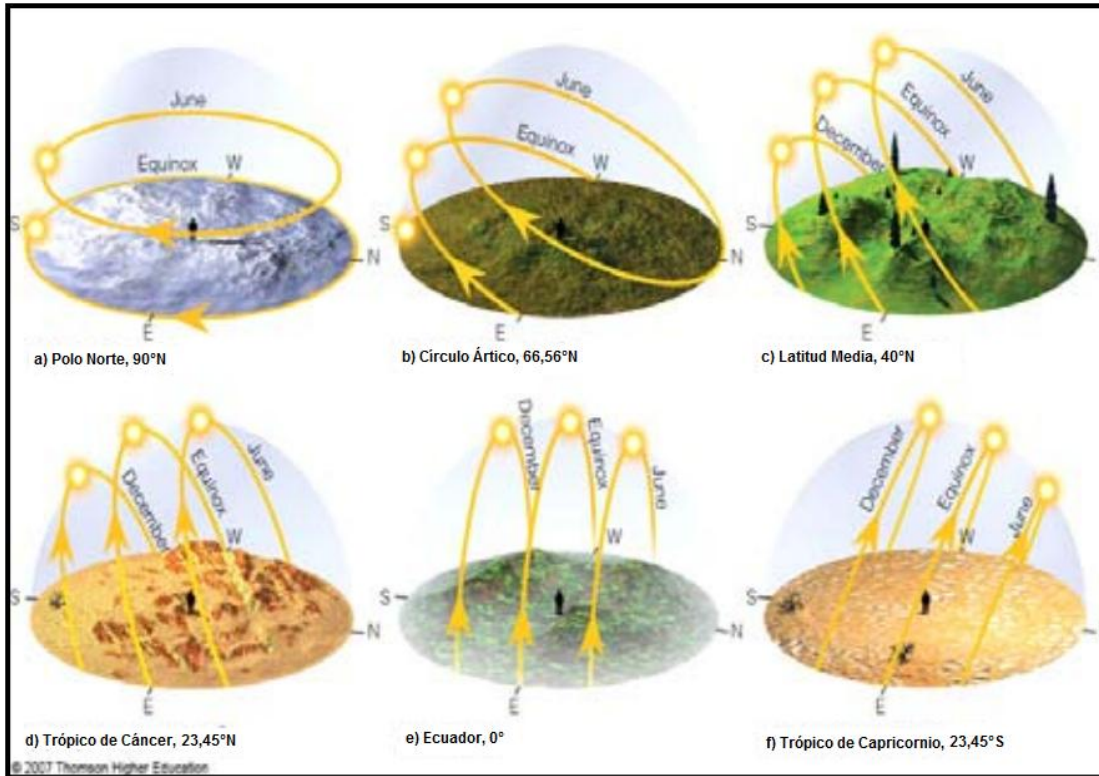
Donde n , es el día del año y se obtiene de la Tabla 1. La declinación solar en el transcurso del año se representa gráficamente en la Figura 9.



La Figura 9 no sólo representa la declinación solar, sino que también representa la latitud para la cual el sol incide perpendicularmente durante el transcurso del año. Por ejemplo: la declinación en el solsticio de junio es de $+ 23,45^\circ$ y el sol incide perpendicularmente sobre el trópico de cáncer cuya latitud es $23,45^\circ$ Norte.

Un efecto de la declinación es la trayectoria solar en el cielo, es decir el recorrido que desde el punto de vista de un observador en la Tierra, hace el Sol en el cielo. Esta trayectoria depende no sólo de la declinación (varía diariamente), sino también de su latitud. En la Figura 10 se observa la trayectoria solar para diferentes latitudes (Polo Norte, 90° N; Círculo Polar Ártico, $66,56^\circ$ N; Latitud 40° N; Trópico de Cáncer, $23,45^\circ$ N; Ecuador, 0° ; y Trópico de Capricornio, $23,45^\circ$ S.) y en diferentes épocas del año (Equinoccios y Solsticios de Junio y Diciembre).

Figura 10. Trayectorias solares para diferentes latitudes y épocas del año. Tomado de: (18)



1.4.3 Relaciones Geométricas en el Análisis de la Radiación Solar

1.4.3.1 Tiempo Solar Verdadero

El tiempo solar es una medida del tiempo fundamentada en el movimiento aparente del Sol sobre el horizonte del lugar. Toma como origen el instante en el cual el Sol pasa por el meridiano del observador, que es su punto más alto en el cielo, denominado mediodía solar. A partir de este instante se van contando las horas en intervalos de 24 partes hasta que logra volver al meridiano del observador. El tiempo solar no coincide con la hora local (llamado tiempo solar medio) debido a que por la forma elíptica de la órbita terrestre el día no tiene la misma duración a lo largo del año. El tiempo solar se calcula mediante la siguiente expresión:

$$t_s = t_L + 4 * (L_{ST} - L_{LOC}) + E_t$$

Ecuación 6

Donde: t_s es el tiempo solar

L_{ST} es el meridiano de hora local

L_{LOC} es el meridiano del observador

E_t es la ecuación del tiempo en minutos, y está determinada por:

$$E_t = 229,18 * (0,000075 + 0,001868 \cos \alpha - 0,032077 \sin \alpha - 0,014615 \cos 2\alpha - 0,040089 \sin 2\alpha)$$

Ecuación 7

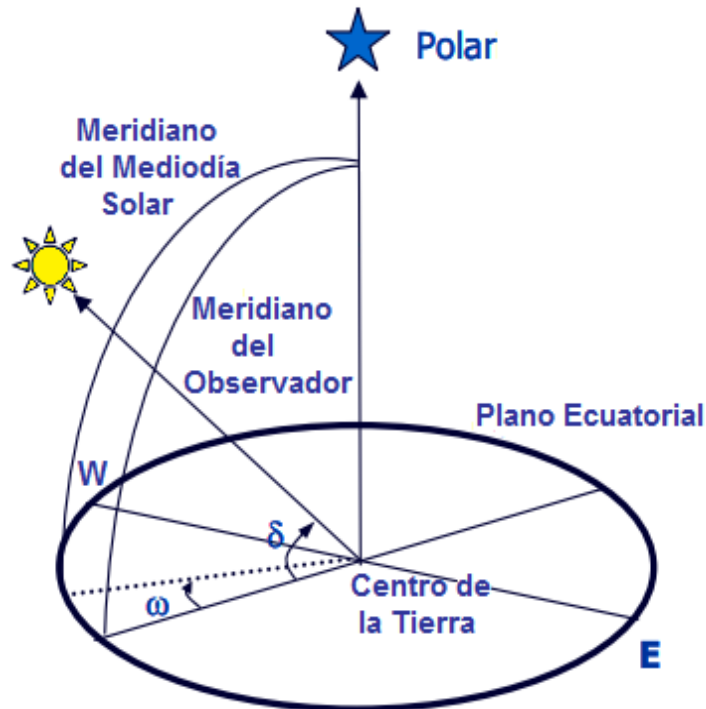
Donde α es la posición angular de la Tierra en la órbita en radianes según la Ecuación 4

El tiempo solar es el tiempo usado en todas las relaciones angulares Tierra-Sol.

1.4.3.2 Ángulo Horario (ω)

Es al ángulo entre el plano del meridiano de interés y el plano del meridiano que toca la línea Tierra-Sol. El ángulo horario es cero en el medio día solar (cuando el meridiano del observador se encuentra sobre la línea Tierra-Sol). El ángulo horario se incrementa en 15° cada hora.

Figura 11. Ángulo Horario. Adaptado de: (16)



La expresión del ángulo horario (ω) es:

$$\omega = 15(t_s - 12) \text{ en grados}$$

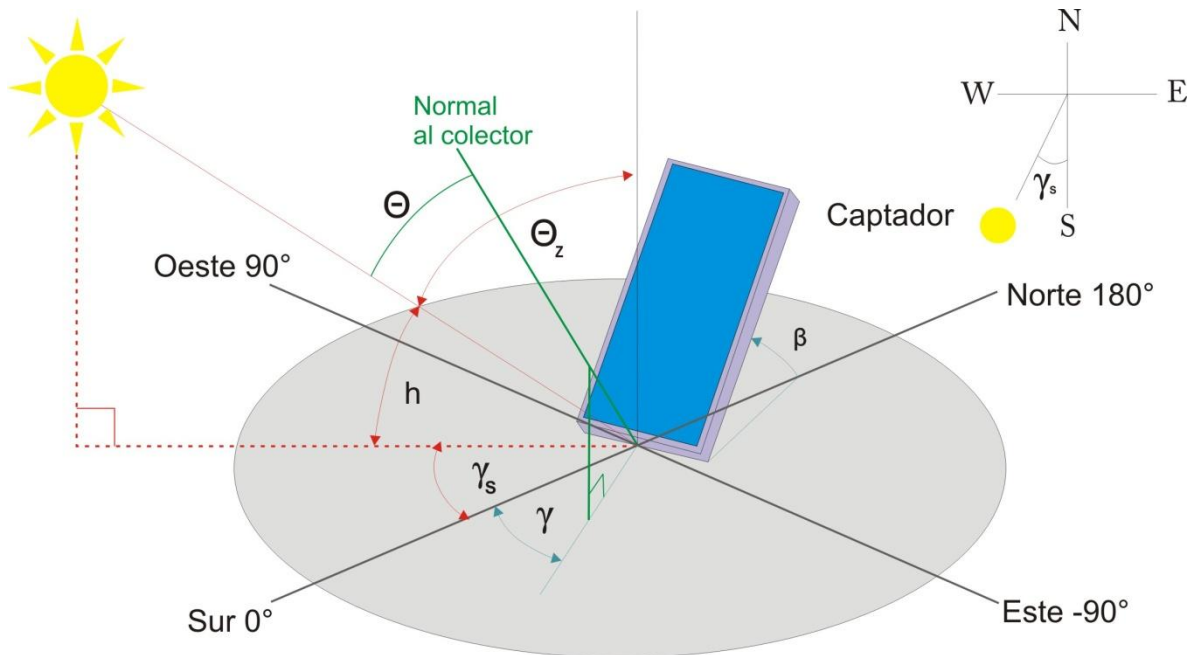
Ecuación 8

Por ejemplo: Si han pasado 3 horas después del mediodía solar, ω equivale a 45° ; si faltan 2 horas y 20 minutos para el mediodía solar, ω equivale a 325° .

1.4.3.3 Relaciones Geométricas Observador-Sol

Las relaciones geométricas entre un observador (puede ser un colector plano) con una orientación cualquiera respecto a la Tierra en cualquier momento y un haz de radiación solar directa pueden ser descritas en términos de algunos ángulos, la mayoría de los cuales están ilustrados en la Figura 12.

Figura 12. Dirección del haz de radiación solar directa. Adaptado de: (14)



Los ángulos y algunas definiciones y convenciones de signos se presentan a continuación:

- φ **Latitud**, la posición angular al norte o sur del ecuador; $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$
- δ **Declinación**, ángulo entre el plano ecuatorial y la línea Tierra-Sol; $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$

- β **Pendiente**, ángulo entre la superficie colectora y la superficie horizontal.
- γ **Azimut de la superficie colectora**, es la distancia angular, medida desde el sur del lugar del colector y la proyección sobre el horizonte de la normal del colector que pasa por el zenit del colector (γ es negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste; por lo tanto, varía entre $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).
- ω **Ángulo horario**, desplazamiento angular del meridiano del Sol con respecto al meridiano local a una razón de 15° por hora.
- θ **Ángulo de incidencia**, el ángulo entre el haz de radiación directa sobre una superficie y la normal a esa superficie.
- θ_z **Ángulo cenital**, el ángulo entre el eje vertical (zénit) y la línea al Sol, es decir, el ángulo de incidencia de una superficie horizontal. Este, al mediodía solar se presenta en su valor más pequeño (el sol se encuentra en el punto más alto en el día), para este instante, el valor del ángulo es: $\theta_z = \varphi - \delta$
- h **Ángulo de altitud solar**, es el ángulo entre el plano horizontal y la línea al Sol, es decir, el complemento del ángulo cenital. La altura solar, al igual que el ángulo cenital, dependen de la declinación (para cada día del año) y de la latitud, es decir, está descrita por la trayectoria solar.
- γ_s **Azimut solar**, El azimut solar es la distancia angular, medida desde el sur del lugar del observador y la proyección sobre el horizonte del meridiano del Sol que pasa por el zénit del observador (es negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste; por lo tanto, varía entre $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$).

Ahora se presenta un grupo de ecuaciones útiles que relacionan algunos de los ángulos.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

Ecuación 9

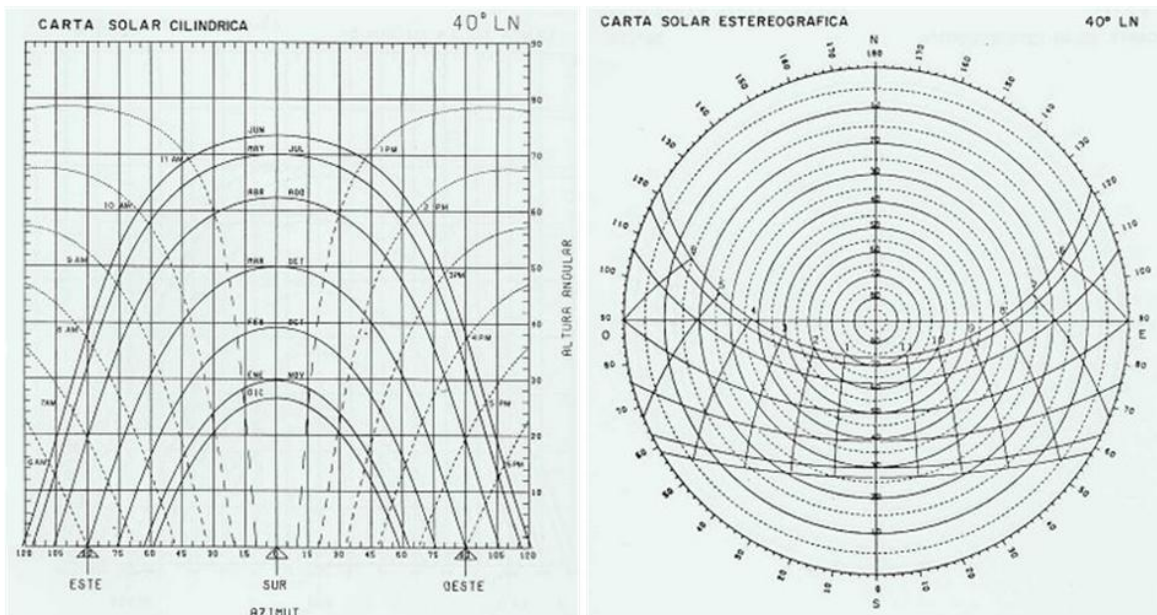
$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)$$

Ecuación 10

1.4.3.4 Carta Solar

La carta solar permite saber la trayectoria solar en cualquier mes y hora del año para una Latitud específica. Existen dos tipos de cartas solares, la cilíndrica y la estereográfica. La carta solar cilíndrica se basa en función de la altura del Sol y el acimut del punto (representación vertical). En el eje vertical se sitúa la altura solar en grados y en el eje horizontal el acimut medido desde el Sur. La carta solar estereográfica representa una vista de planta de la trayectoria solar, los círculos concéntricos representan el ángulo de la altura solar, en el exterior se encuentra marcado el ángulo del acimut.

Figura 13. Tipos de carta solar. Tomado de: (19)



Una de las aplicaciones de la carta solar es conocer la cantidad de horas de sol teóricas (con cielo despejado) que recibe un determinado punto. También se puede construir la carta con perfil de obstáculos teniendo en cuenta el acimut y altura de los objetos y así determinar en qué momentos el punto en consideración no recibe los haces de radiación directa.

1.4.4 Variación de la Intensidad de Radiación Solar Extraterrestre

Existen dos causas de la variación de la radiación solar extraterrestre. Una de ellas es la modificación en la cantidad de radiación emitida por el Sol. Esta variación se debe en su mayoría a la actividad en la superficie solar causada por las manchas solares, sin embargo el cambio en la radiación emitida por el Sol se ve afectada en un valor inferior al 1.5% (10), razón por la cual la cantidad emitida por el Sol se considera como una cantidad fija. La segunda causa en la variación de la radiación solar extraterrestre es el cambio en la distancia Tierra-Sol. Debido a que la intensidad de la energía solar varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al Sol, y junto con la Ecuación 3, la variación del valor de la constante solar se puede calcular como:

$$I_n = I_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2$$

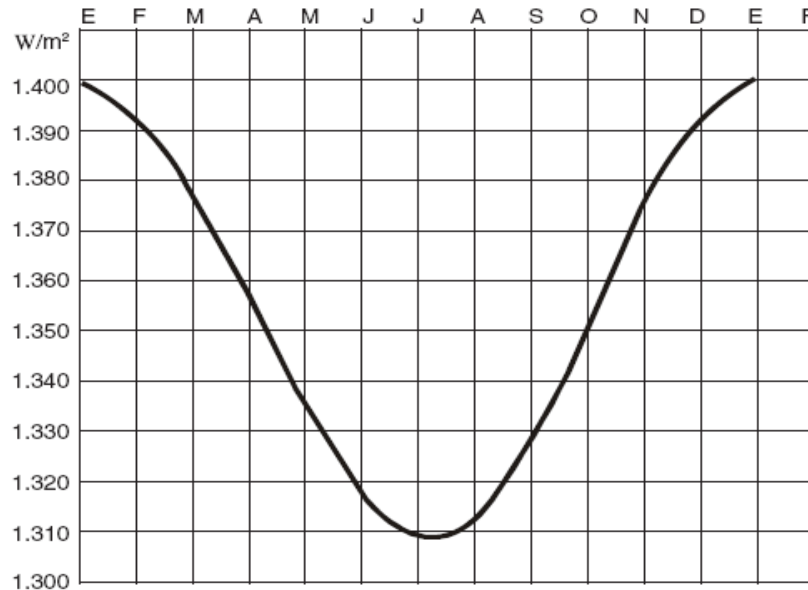
Ecuación 11

Donde:

- I_n es la intensidad de la radiación solar en el día n
- I_0 es la constante solar ($I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$)
- R_0 es la distancia media Tierra-Sol (1 U.A.)
- R es la distancia Tierra-Sol en el día n

La variación de la radiación solar anual sobre la atmósfera se observa en la Figura 14. Se observa que el valor de la radiación solar es igual a la constante solar en los equinoccios de primavera y otoño (del hemisferio norte).

Figura 14. Variación de la radiación solar afuera de la atmósfera terrestre Tomado de: (13)



1.4.5 Radiación Solar Diaria Fuera de la Atmósfera Terrestre

La radiación solar diaria que incide sobre una superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre denotada por $H_o(n)$, donde n es el número de día del año según la Tabla 1, establecida en una latitud determinada, se ilustra en la Figura 15, representa la cantidad de energía incidente sobre esa superficie desde la salida hasta la puesta del Sol; si existiera una atmósfera totalmente transparente a esa radiación, llegaría inalterada sobre la superficie terrestre y tendría el mismo valor y comportamiento. La siguiente expresión permite determinarla:

$$H_o(n) = \int I_n \cos \theta dt$$

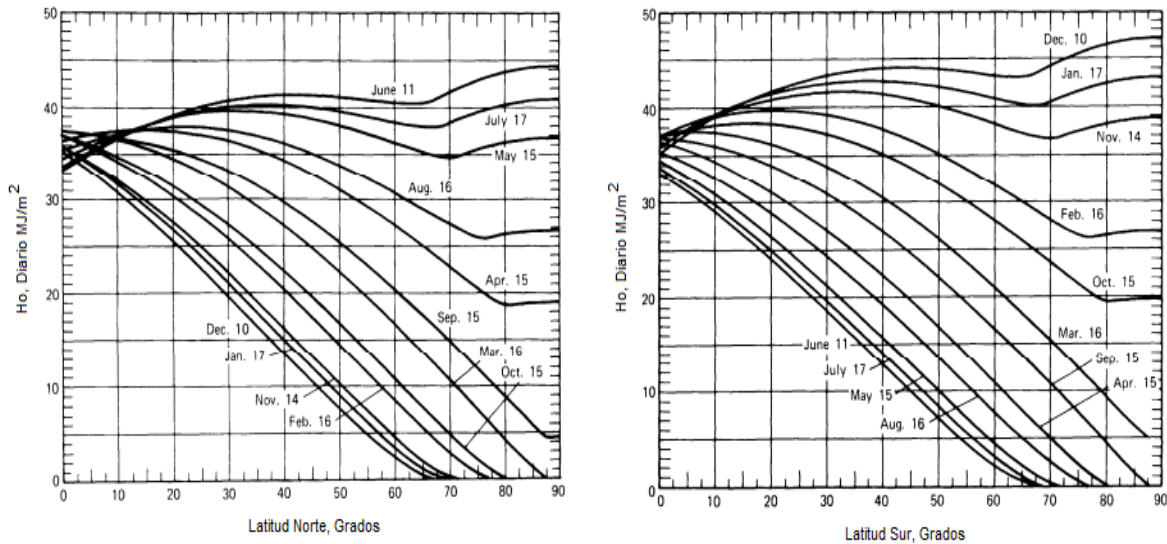
Ecuación 12

Sustituyendo $\cos \theta$, I_n y dt en la ecuación y desarrollando la integral se obtiene:

$$H_o(n) = \frac{24}{\pi} I_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \left(\cos \varphi \cos \delta \operatorname{Sen} \omega + \frac{2\pi\omega}{360^\circ} \operatorname{Sen} \delta \operatorname{Sen} \varphi \right)$$

Ecuación 13


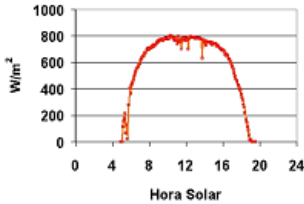

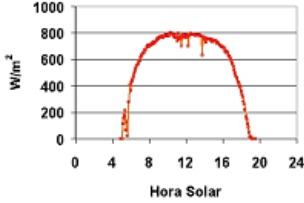

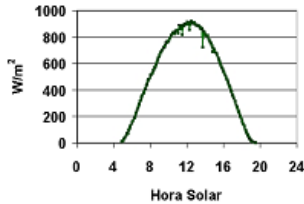
Figura 15. Radiación diaria sobre una superficie horizontal y paralela a la superficie terrestre fuera de la atmósfera.
Tomado de: (10)





1.5 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN Y EL BRILLO SOLAR

Para medir la radiación solar se utilizan radiómetros solares como los piranómetros o solarímetros y los pirheliómetros. Según sus características pueden servir para medir la radiación solar global (directa más difusa), la directa (procedente del rayo solar), la difusa, la neta y el brillo solar. Los más comúnmente usados en el país se muestran en la Tabla 2 con una breve descripción de su funcionamiento.

Tabla 2. Instrumentos para la medición de la radiación y el brillo solar. Tomado de: (13)

TIPO INSTRUMENTO	IMAGEN	PARÁMETRO DE MEDIDA	DESCRIPCIÓN	SALIDA
Pirheliómetro Absoluto		Radiación Directa	El instrumento posee dos cavidades cónicas idénticas: una externa, que se calienta al estar expuesta a la radiación solar, mientras la otra cavidad, oculta en el interior del instrumento, se calienta utilizando energía eléctrica hasta obtener una temperatura igual a la cavidad externa, asignándose el valor de la energía eléctrica consumida como el valor de la radiación solar incidente. Debe montarse sobre un seguidor solar. Se emplea como patrón primario.	
Pirheliómetro de Incidencia Normal		Radiación Directa	Se calibran por inter-comparación con un pirheliómetro de cavidad absoluta. Uno de los varios diseños existentes en el mundo es el pirheliómetro Eppley de incidencia normal, el sensor consiste de una termopila que puede ser de plata-bismuto o de cobre-constatan. La sensibilidad se da en mV/ (W/m²) y la lectura puede hacerse fácilmente con un voltímetro digital. Este instrumento requiere de un seguidor de Sol. Sirve como patrón secundario para calibración de equipos.	
Piranómetro		<ol style="list-style-type: none"> 1) Radiación Global, 2) Radiación directa, 3) Radiación difusa, 4) Radiación solar reflejada. (usado como patrón nacional)	El <i>piranómetro</i> , es el instrumento más usado en la medición de la radiación solar. Mide la radiación semiesférica directa y difusa (global) que se mide sobre una superficie horizontal, obtenida a través de la diferencia de calentamiento de dos sectores pintados alternativamente de blanco y negro en un pequeño disco plano. Cuando el aparato es expuesto a la radiación solar, los sectores negros se vuelven más cálidos que los blancos. Esta diferencia de temperatura se puede detectar electrónicamente mediante un sensor termoelectrico o termopila, protegido por una cúpula de vidrio, generándose un voltaje eléctrico proporcional a la radiación solar incidente. Un ejemplo de piranómetro es el Blanco y Negro Eppley (BWP) de 1ª clase de la Imagen.	

<p>Piranómetro Espectral</p>		<p>Radiación Global en intervalos espectrales de banda ancha</p>	<p>Miden radiación global en intervalos espectrales de banda ancha, se pueden usar filtros en lugar de la bóveda de cristal para medir la radiación en diversos intervalos espectrales, por ejemplo: la radiación ultravioleta. En la imagen se observa un piranómetro espectral de precisión Eppley (PSP).</p>	
<p>Piranómetro de Difusa</p>		<p>Radiación Difusa</p>	<p>Las mediciones de la radiación difusa se realizan con Piranómetros cuyo sensor es sombreado por una banda o disco, de manera que no deja pasar radiación solar directa. El más tradicional utiliza la banda de sombra en forma de aro o semiarco, puesto de acuerdo con la declinación del sol y la latitud del lugar. De esta manera, el sensor se protegerá de la radiación directa durante el día.</p>	
<p>Heliógrafo o Solarímetro</p>		<p>Brillo Solar</p>	<p>El instrumento recomendado por la OMM¹⁰ para la medición del brillo solar es el registrador CAMPBELL-STOKES. Este instrumento tiene por objeto medir la duración de la insolación diaria. Registra los periodos de tiempo de radiación solar directa que superan un valor mínimo (Brillo Solar). Opera focalizando la radiación solar mediante una esfera de vidrio a manera de lente convergente, en una cinta con escala de horas, que, como resultado de la exposición a la radiación solar directa, se quema formando líneas cuya longitud determina el número de horas de brillo del Sol. En localidades donde no se mida directamente la radiación solar global, es posible obtenerla a partir de los valores de horas de brillo solar, mediante un modelo de regresión lineal simple llamado Angstrom Modificado.</p>	

¹⁰ Organización Mundial de Meteorología

1.6 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

En ausencia de datos experimentales de radiación solar, se puede utilizar alguna de las múltiples correlaciones que se han desarrollado para estimar la energía solar sobre una determinada localidad. Tales correlaciones establecen una dependencia matemática entre variables climatológicas y geográficas fácilmente medibles como el brillo solar, pluviosidad, humedad relativa, latitud del lugar etc.

Existe un método llamado “Estimación de la Radiación Solar Global Mediante el Modelo de Angstrom Modificado” para hallar la radiación solar de acuerdo a las mediciones de brillo solar. La expresión matemática utilizada en este modelo tiene la forma:

$$\frac{H}{H_0} = \left(a + b \frac{n}{N} \right)$$

Ecuación 14

Donde H es la integral de la radiación global medida en la superficie; H_0 es la radiación solar global extraterrestre dada por la Ecuación 13 para un día determinado sobre la localización deseada; n es el número de horas de brillo solar medidas en superficie; N es la duración del día calculada a partir de consideraciones astronómicas; a y b son, respectivamente, el término independiente y la pendiente de la recta de ajuste determinada por mínimos cuadrados entre H/H_0 y n/N . Tanto H_0 como N se calculan teniendo en cuenta la posición geográfica del lugar, la declinación solar y el ángulo horario para la salida del Sol.

2 ENERGÍA GEOTÉRMICA

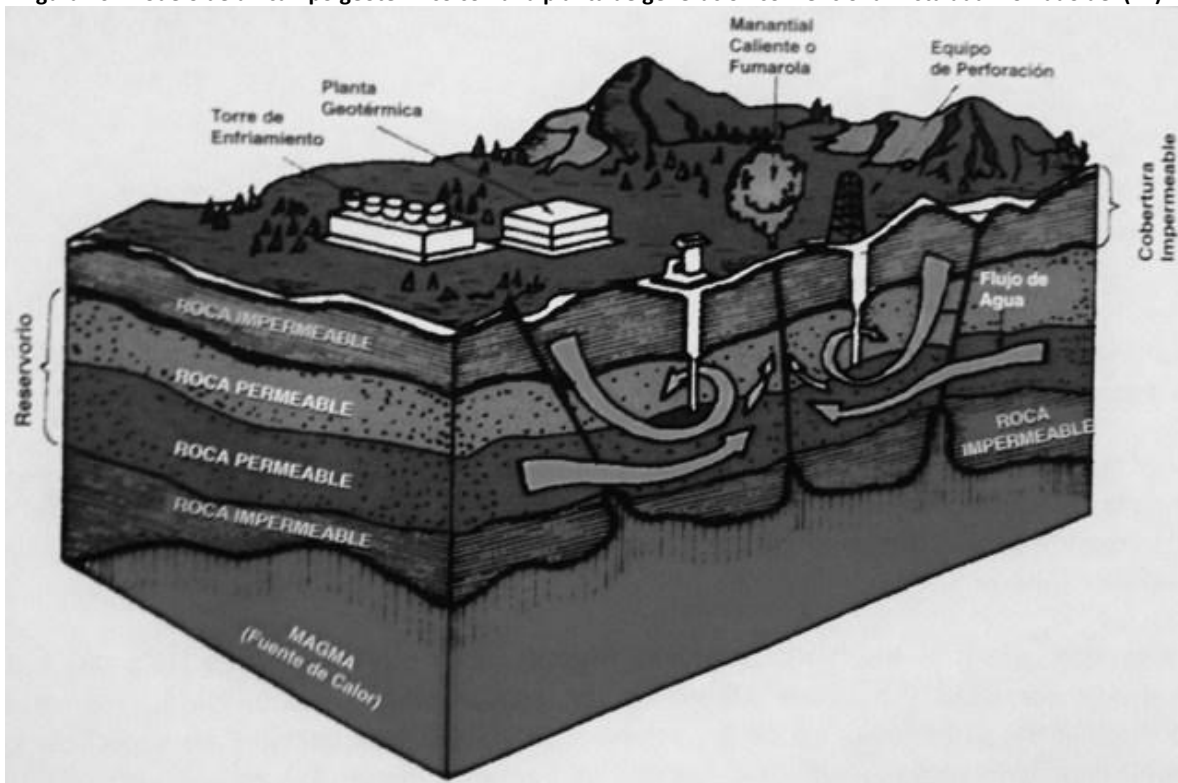
Etimológicamente hablando, la palabra geotermia se refiere al calor natural existente en el interior de la tierra (20). En el interior de la tierra se almacenan grandes cantidades de energía originada en la descomposición de elementos radiactivos en el núcleo del planeta. Desde un punto de vista práctico la geotermia cubre el estudio y aprovechamiento de la energía calorífica que se transfiere desde el interior de la corteza terrestre hacia la superficie. El transporte de esta energía puede ser por conducción, por difusión, por movimientos de convección en el magma y por circulación de agua en las profundidades. La energía geotérmica se manifiesta en la superficie con géiseres, fumarolas, manantiales de agua caliente, y bajo la superficie, mediante zonas geopresurizadas o zonas de roca caliente que se crean por la intrusión de material magmático a temperaturas entre 600 y 1 000 °C(21). Ahora se definen algunos de estos términos (22) y (23):

- Manantiales de agua caliente (*Hot Springs*): Son los lugares donde el agua caliente se eleva hacia la corteza terrestre formando ya sea pequeños lagos o riachuelos.
- Géiser: Son hoyos en la tierra por los cuales sale expulsada agua y/o vapor con cierta regularidad
- Fumarola: Es una abertura en la superficie de la tierra que emite vapor y gases azufrados.
- Acuífero: Agua confinada en roca permeable o material granulado por debajo de la superficie de la tierra.
- Reservorio o yacimiento: Es la parte explotable de un campo geotérmico. Es un acuífero de suficiente temperatura, permeabilidad y tamaño para asegurar la explotación prolongada de fluidos geotérmicos.

2.1 CAMPOS GEOTÉRMICOS

Un campo geotérmico es el área en la cual se puede explotar el recurso geotérmico. Esta área se establece una vez definidas las características de las fuentes de calor, las dimensiones del reservorio y la posibilidad técnico-económica de construir una planta para el aprovechamiento múltiple del recurso geotérmico. Un modelo para un campo geotérmico se muestra en la Figura 16, en esta figura se observa una planta de generación de energía eléctrica convencional.

Figura 16. Modelo de un campo geotérmico con una planta de generación convencional instalada. Tomado de: (12)



Se pueden distinguir cuatro clases de campos geotérmicos (campos de vapor seco, de vapor húmedo, de agua caliente o de rocas calientes), dependiendo de la temperatura media y de la formación geológica de la fuente de calor (24) y (25).

- Campos de vapor seco: Son fuentes que producen principalmente vapor saturado seco o vapor supercaliente a altas presiones. Estos usualmente se encuentran en los rangos más profundos en la perforación. Este tipo de depósito es el más raro,

pero a la vez es el más fácil y económico de explotar debido a que presenta muy pocos problemas de corrosión

- Campos de vapor húmedo: Producen agua presurizada a temperaturas en el rango de 180-370 °C, que a menudo contienen impurezas y contaminantes como compuestos y gases de azufre. Cuando el fluido es traído a la superficie, del 10 al 20% de este se convierte en vapor debido a la reducción de presión. Estos campos son aproximadamente unas 20 veces más abundantes que los de vapor seco.
- Agua caliente: Son principalmente acuíferos y manantiales de agua caliente, los cuales muchas veces contienen vapor y sales de sodio y azufre, sin embargo existen acuíferos con muy poca cantidad de elementos contaminantes y bajas emisiones de gases.
- Campo de roca caliente: La mayoría del calor geotérmico explotable se encuentra almacenado en rocas secas, más que en acuíferos y vapor. El gradiente normal de temperatura geotérmica es de 20-30 °C /km, esto es suficiente para producir temperaturas de hasta 180 °C a una accesible profundidad de 5,5 km. En lugares de alta actividad geotérmica, el gradiente de temperatura es mayor a 40 °C/km, lo roca subterránea caliente es llamada “roca seca caliente”¹¹. En el proceso de funcionamiento de este tipo de campos, se debe fracturar la roca para inyectar agua como fluido de trabajo, la fractura de la roca se puede realizar ya sea mediante explosiones o induciendo estrés térmico mediante el uso de agua fría, además se debe formar un grupo de canales por los cuales el agua pueda fluir hacia adentro y hacia afuera. Aunque se han realizado investigaciones de este tipo de explotación, aún no existen campos con este tipo de tecnología.

Según su temperatura, los recursos geotérmicos se pueden clasificar en recursos de alta, media o baja entalpía, esta clasificación varía según algunos autores, esta clasificación y la comparación entre algunos autores se muestra en la Tabla 3.

¹¹ Del inglés *Hot Dry Rock*.

Tabla 3. Clasificación de los recursos geotérmicos de acuerdo a la temperatura. Tomado de: (21)

Descripción	Autor			
	Muffler & Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Benderitter & Cormy (1990)	Haene, Rybach & Stegna (1998)
Baja Temperatura	< 90 °C	< 125 °C	< 100 °C	< 150 °C
Media Temperatura	90 - 150 °C	125 - 225 °C	100 - 200 °C	-
Alta Temperatura	> 150 °C	> 225 °C	> 200 °C	> 150 °C

2.2 USOS DIRECTOS DE LA GEOTERMIA

Actualmente los recursos geotérmicos no solamente son susceptibles de ser aprovechados en la generación de electricidad, sino también en una gran variedad de actividades agrupadas bajo el nombre genérico de usos directos, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes: calefacción, procesamiento de alimentos, lavado y secado de lana, fermentación, industria papelera, producción de ácido sulfúrico, manufactura de cemento, y otras, como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Usos directos de la Geotermia. Tomado de: (26)

Temperatura °C	Usos
200	---O---
180	Evaporación de soluciones altamente concentradas. Refrigeración por absorción de amoníaco, digestión de pasta papelera (Kraft) Agua pesada mediante un proceso con sulfuro de hidrógeno.
160	Secada de alimento para pescado, secado de madera. Alúmina mediante el proceso Bayer.
140	Secado de productos agrícolas a altas velocidades, enlatados de alimentos.
120	Extracción de sales por evaporación, evaporación en la refinación de azúcar. Agua dulce por destilación Concentración de solución salina mediante evaporación de efecto múltiple Secado y curado de planchas de hormigón ligero

100	Secado de materiales orgánicos, algas, hierba, hortalizas, etc. Lavado y secado de lana
80	Secado de pescado, operaciones intensas de descongelamiento. Calefacción ambiental. Refrigeración (limite de temperatura inferior).
60	Zootecnia. Invernaderos mediante una combinación de calefacción ambiental y de foco Cultivo de setas
40	Calentamiento del suelo, balneología, Piscinas, biodegradación, fermentaciones. Agua caliente para la industria minera durante todo el año en climas fríos. Descongelamiento.
20	Criaderos de peces. Piscicultura.

2.3 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE MÉTODOS CONVENCIONALES

De acuerdo con las características de producción del campo geotérmico, por ejemplo flujo másico y entalpía, se puede seleccionar tanto el tamaño como el ciclo térmico de la planta de generación.

La capacidad instalada de generación de la planta puede determinarse con base en el mercado de energía y la productividad actual del yacimiento (este se realiza por medio de la simulación del modelo matemático de la reserva). El ciclo térmico se selecciona, de acuerdo con características del fluido, pero también tomando en consideración las condiciones económicas del proyecto.

En general se tienen tres ciclos, para la producción de energía eléctrica:

- Ciclo con unidades de contrapresión
- Ciclo con unidades de condensación
- Ciclo binario

A continuación se hará una breve explicación de cada uno de ellos.

2.3.1 Ciclo con unidades de contrapresión

Los fluidos de alta entalpía pueden contener vapor seco o una mezcla de vapor y agua, en dicho caso, el agua y el vapor son divididos por un separador ciclónico. El vapor va a la turbina y el agua a reinyección.

Ese tipo de turbinas tienen un bajo costo pero también baja eficiencia. Su tamaño es pequeño, generalmente entre 1 a 5 MW y es instalada cerca de las bocas de los pozos. El consumo de vapor es del orden de 15 kg/kWh, que es cerca del doble de la cantidad utilizada por las turbinas que condensan eficientemente.

Este ciclo, el vapor es descargado a la atmósfera después de la expansión en la turbina, es usado en campos con un alto contenido de gas, (superior al 10%), debido a que la extracción de gas para plantas de condensación, puede llegar a ser relativamente costosa para una concentración de gas en este rango, la implementación de plantas binarias también puede ser una solución adecuada.

Las unidades de contra-presión, pueden ser instaladas e implementadas, en pocos meses y ser trasladadas de un sitio a otro; por consiguiente, son adecuadas para instalar provisionalmente en cualquiera de las fases en el desarrollo del campo. Esta fase es recomendada debido a que esto anticipa la recolección de recursos de explotación del campo, permitiendo un eficiente monitoreo del comportamiento del campo, antes de la instalación de las plantas de generación.

2.3.2 Ciclo con unidades de condensación

En este ciclo el vapor es condensado a la salida de la turbina, la presión en la cámara de escape baja a alrededor de 0,10-0,12 Bar, que incrementa la entalpía diferencial y por consiguiente la eficiencia del ciclo. El consumo de vapor es del orden de 7-8 kg/kWh siempre y cuando el contenido de gas sea menor del 1% y unas condiciones climáticas adecuadas.

La producción en campos donde los fluidos están dominados por agua, requiere el uso de separadores vapor/agua, con cualquiera, single o doble flash. En los sistemas tipo single flash se puede seleccionar la presión de separación, así en la conexión de entrada de la turbina la presión puede ser optimizada (generalmente entre 5 y 7 Bar). En esas condiciones, el separador de agua mantiene una temperatura del orden de 150-170°C, esta agua, por consiguiente, estará de nuevo a baja presión (2-2,5 Bar), y la alimentación de la turbina se encontrara en unas condiciones adecuadas.

Un ciclo doble no es siempre recomendado por dos razones; la primera es que la temperatura final del agua separada (alrededor de 120°C) generalmente incrementa las incrustaciones en los pozos de reinyección. Segundo; el costo del equipo no necesariamente da como resultado un incremento en la producción de energía, que compense la inversión adicional, especialmente cuando el contenido del agua en un fluido geotérmico decrece con el tiempo, como ocurre a menudo en reservas de alta entalpía.

2.3.3 Ciclo binario

En este ciclo el fluido geotérmico viaja a través del intercambiador de calor, allí se evapora un fluido secundario de bajo punto de ebullición (cloro-fluoro-carbonado, amoniaco, isobutano), que impulsa una turbina y es condensado y reciclado dentro de un sistema cerrado. Ese tipo de unidades son usadas en la mayoría de los casos para la producción de energía eléctrica, utilizando recursos con baja y media temperatura. Un parámetro para seleccionar el fluido secundario es la temperatura de funcionamiento (aproximadamente 90°C)

Ese tipo de unidades tiene alto costo por unidad de capacidad instalada en comparación con las de condensación convencional pero en muchos casos son la alternativa más adecuada para el desarrollo geotérmico. Se puede obtener una alta eficiencia especialmente cuando el contenido de gas del fluido es alto, en tal caso las plantas binarias pueden llegar a ser más económicas que las unidades de condensación convencional (que tengan incorporado equipo para extracción de gas), para un fluido de

entalpía media las plantas binarias generalmente son la alternativa más económica sin preocuparse por el contenido de gas. Las unidades con ciclo binario proveen un alto grado de flexibilidad y permiten optimizar el recurso geotérmico por medio de la combinación de sistemas en cascada.

2.3.4 Tipo de plantas

2.3.4.1 Plantas tipo vapor directo (*direct steam*)

Las plantas de este tipo también se denominan (Vapor seco) usan reservas de vapor seco, el cual puede ser saturado o sobrecalentado, el cual lleva cierta cantidad de gases no condensables de composición y concentración variable.

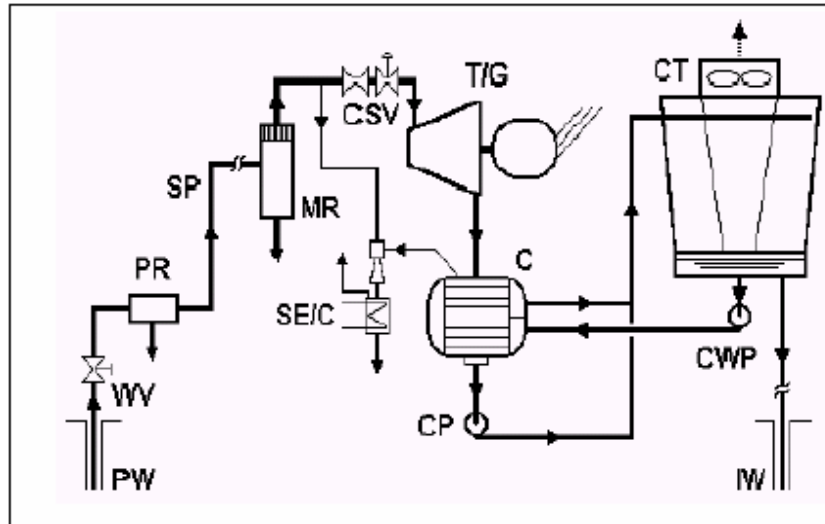
El vapor es llevado de varios pozos a través de una tubería a la casa de máquinas donde es usado directamente en turbinas tipo impulso/reacción. Entre la boca del yacimiento y la planta existen separadores centrífugos situados cerca del yacimiento para remover partículas tales como polvo y sólidos tales como pedazos de la piedra; a lo largo de la tubería se instalan puntos de drenaje para remover la condensación de vapor que se forma durante la transmisión, y así remover la humedad a la entrada de la casa de máquinas.

La Figura 17 muestra un diagrama simplificado de las plantas tipo *Direct-Steam*. En el vapor geotérmico se encuentran gases no condensables (NCG), usualmente entre 2 al 10%, lo cual hace que sea necesario un sistema de extracción de gas, (componente crítico de la planta). Usualmente, se utilizan eyectores de dos etapas, con condensadores tanto dentro como al final de los mismos, sin embargo en algunos casos es necesario colocar bombas de vacío o turbo compresores.

Un condensador tipo superficie se presenta en la Figura 17, pero se usan a menudo los condensadores de contacto directo; el anterior se prefiere siempre que el vapor de NCG deba tratarse o debe procesarse antes de descargarlo a la atmósfera por ejemplo siempre exista la posibilidad que los límites para el ácido sulfhídrico sean excedidos, en tales

casos una planta de química puede ser instalada para remover dicho compuesto, sin embargo para una planta pequeña no es económicamente viable.

Figura 17. Diagrama simplificado planta tipo vapor directo. Tomado de: (26)



CONVENCIONES							
CP	Bomba de condensado	C	Condensador	SE/C	Eyector / condensador vapor	PW	Pozos de producción
CSV	Válvulas de control y parada	CT	Torre de enfriamiento	SP	Tubería de Vapor	PR	Reductor de presión
IW	Pozos de inyección	CWP	Bomba para agua de refrigeración	T/G	Turbina / generador	WW	Válvulas de Cabeza de pozo
MR	Removedor de humedad						

Como se observa en la Figura 17 el sistema incluye un condensador de refrigeración. El vapor condensado no recircula a la caldera, tal como en una planta de generación convencional, este se utiliza para alimentar la torre de enfriamiento, el exceso de condensado típicamente de 10-20% de peso del vapor, es usualmente reinyectado al yacimiento. A largo plazo la producción puede agotar las reservas y se están explorando técnicas para aumentar la cantidad de fluido reinyectado. El uso los condensadores de

aire permitirían el 100% retorno pero hasta ahora han sido antieconómicos. Las torres de enfriamiento de tiro mecánico, ya sea de flujo continuo o cruzado son las más usadas para sistemas de enfriamiento tipo húmedo, sin embargo, en algunas plantas se utilizan las torres de tiro natural. En la actualidad las plantas tienen unos rangos de 20-60 MW por unidad, dichas unidades tienen un diseño modular para rápida instalación, el diseño flexible permite adaptarse a un amplio rango de condiciones de vapor.

2.3.4.2 Plantas Tipo Flash-Steam

Los yacimientos de vapor seco, son poco frecuentes. Los más conocidos son aquellos donde predomina la fase líquida. En pozos artesianos, el fluido producido es una mezcla de las dos fases, líquido y vapor. La calidad de la mezcla (por ejemplo porcentaje de vapor) es función de las condiciones del fluido en el yacimiento, las dimensiones del pozo, y la presión en la cabeza del pozo, la cual se controla mediante una válvula o por medio de una placa de orificio.

A pesar de que algunas máquinas experimentales han generado energía impulsadas por un fluido que cuenta con las dos fases (líquido y vapor), convencionalmente se separan las fases y solo se usa el vapor para impulsar la turbina debido a su presión en la cabeza del pozo es baja, típicamente entre 0,5-1 MPa, la fase líquida y la gaseosa difieren significativamente en la densidad ($\rho_f/\rho_g=175-350$) permitiendo una separación efectiva por la acción centrífuga. Los separadores centrífugos producen vapor con calidades superiores al 99,99%.

El líquido proveniente del separador puede ser reinyectado, usado para producir energía térmica por medio de intercambiadores de calor para gran variedad de aplicaciones directas, o aplicaciones de baja presión inmediatas mediante la válvula de control o la placa de orificio. Las plantas en las que se utiliza vapor a alta presión para generar energía son las llamadas *single flash* y las que usan tanto el vapor a alta y a baja presión son denominadas *double flash*.

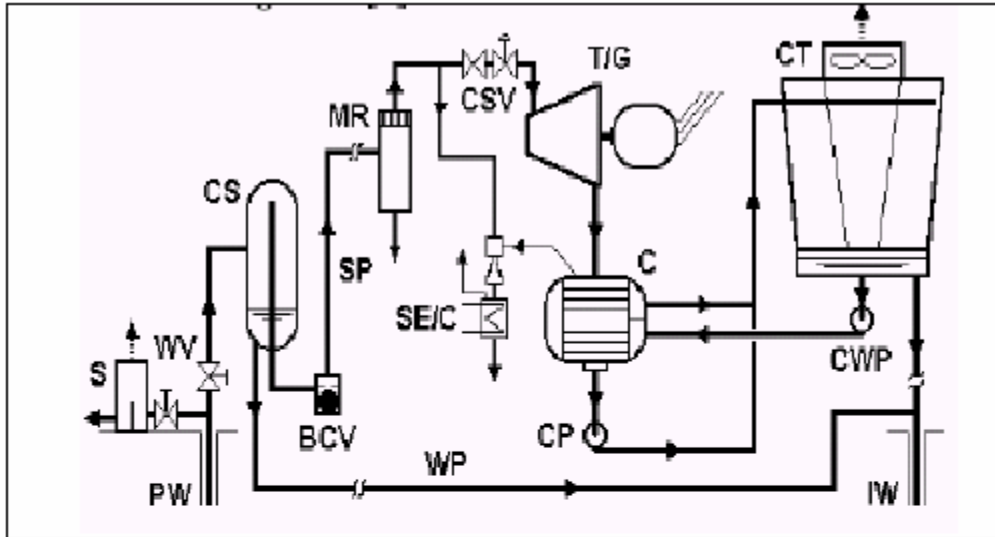
2.3.4.3 Plantas tipo “single flash”

El fluido con las dos fases proveniente del pozo es dirigido horizontal y tangencialmente en el separador ciclónico. El líquido tiende a fluir en forma circular por las paredes, mientras que el vapor sube y es removido por un tubo vertical. El diseño es muy simple ya que no tiene partes móviles y es conocido como separador de salida en el fondo. En ocasiones se utilizan baffles para mejorar la segregación de las dos fases, una válvula de bola provee seguridad ante la presencia de impurezas del líquido que pueda entrar en la línea de vapor. Las líneas de transmisión de vapor son esencialmente las mismas que las usadas en las plantas tipo *Dry-Steam*.

El balance de la planta es también es prácticamente idéntico a las plantas tipo direct-steam, la principal diferencia es la cantidad de líquido que debe ser manejado. Comparando plantas de 55MW, una planta típica *Single-Flash* produce cerca de 630 Kg/s de líquido sobrante, mientras que una planta *Direct-Steam* produce 20Kg/s, una relación de 30 a 1, si todo este líquido es reinyectado a la planta *Single-Flash* podrá retornar al yacimiento cerca del 85% de la masa producida, en comparación del 15 % de la planta tipo *Direct-Steam*.

Un diagrama simplificado de una planta de este tipo se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Diagrama de planta tipo *single flash*. Tomado de:(26)



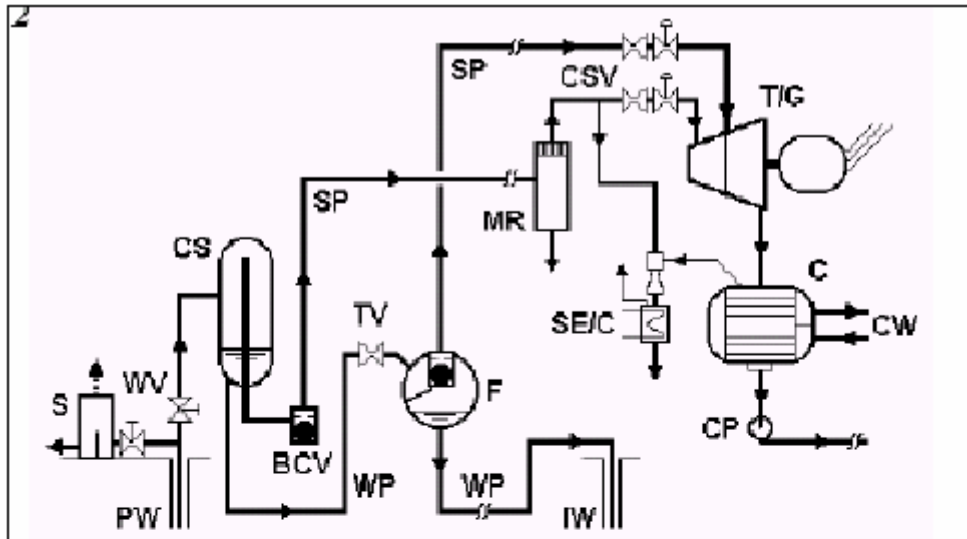
CONVENCIONES							
BCV	Válvula de cheque Tipo bola	WP	Tubería de Agua	MR	Removedor de humedad	CWP	Bomba para agua de refrigeración
CP	Bomba de condensado	C	Condensador	SE/C	Eyector / condensador vapor	PW	Fluido de producción del pozo
CSV	Válvulas de control y parada	CS	Separador Ciclónico	SP	Tubería de Vapor	S	Silenciador
W	Pozos de inyección	CT	Torre de enfriamiento	T/G	Turbina / generador	WV	Válvulas de Cabeza de pozo

2.3.4.4 Plantas tipo "double flash"

Mediante esta tecnología se puede obtener entre un 20 a un 25% de potencia adicional a partir del mismo fluido geotérmico. El vapor de baja presión producido al estrangular el líquido a baja presión es enviado a una turbina de baja presión o a una etapa adecuada de la turbina principal (en el caso de una turbina de admisión dual). Los principios de operación de este tipo de planta es similar a la planta tipo *Single Flash*, sin embargo es mucho más costosa debido a que requiere mayor equipamiento.

En la Figura 19 se muestra un diagrama simplificado de este tipo de plantas.

Figura 19. Diagrama de planta tipo *double flash*. Tomado de: (26)

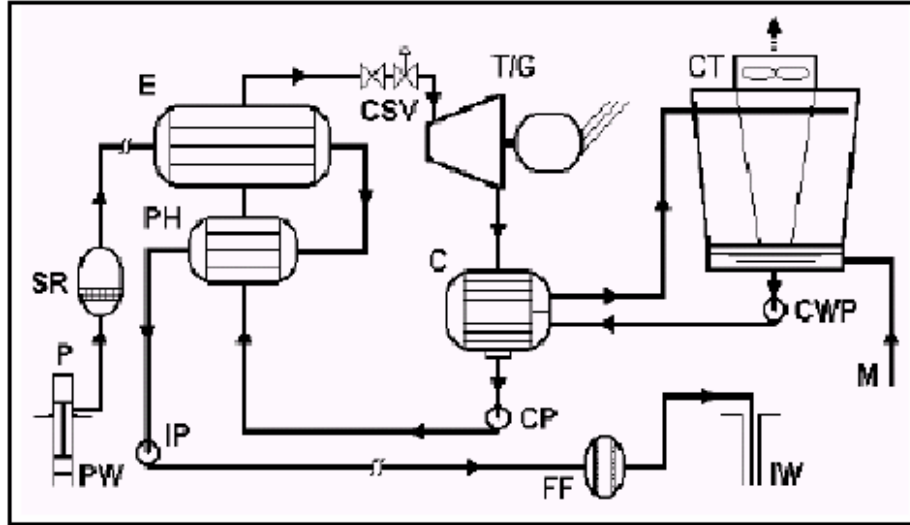


CONVENCIONES											
BCV	Válvula de cheque Tipo bola	WP	Tubería de Agua	IW	Pozos de Inyección	F	"Flasher"	SP	Tubería de Vapor	SH	Sobrecalentador
CP	Bomba de condensado	C	Condensador	MR	Removedor de humedad	PW	Fluido de producción del pozo	E	Evaporador	S	Silenciador
CSV	Válvulas de control y parada	CS	Separador Ciclónico	TIG	Turbina / generador	TV	Válvula Reguladora	CW	Agua de refrigeración	WV	Válvulas de Cabeza de pozo
SE/C	Eyector / condensador vapor										

2.3.4.5 Plantas tipo binario (Binary plants)

En una planta tipo Binario la energía térmica del fluido geotérmico se transfiere por medio de un intercambiador de calor a un fluido de trabajo secundario para uso en un ciclo convencional. El fluido geotérmico no está en contacto con las partes móviles de la planta, así mismo minimiza y en muchos casos elimina los efectos de la erosión, las plantas binarias tienen ventajas puesto que pueden manejar fluido geotérmico de baja temperatura (menos de 150 °C), de alto contenido de gases disueltos y corrosivos.

Figura 20. Diagrama simplificado de planta tipo binario (binary plants). Tomado de: (26)



CONVENCIONES									
CP	Bomba de condensado	C	Condensador	IW	Pozos de Inyección	IP	Bomba inyección	M	Agua de reposición
CSV	Válvulas de control y parada	CWP	Bomba para agua de refrigeración	PH	Pre calentador	SR	Removedor de arena	FF	Filtro Final
E	Evaporador	PW	Fluido de producción del pozo	T/G	Turbina / generador	PH	Bomba de pozo	CT	Torre de enfriamiento

Un diagrama de este tipo de planta se presenta en la Figura 20, el ciclo consiste en un pre calentador, un evaporador, válvulas de control, el conjunto turbina generador, un condensador y una bomba de alimentación. El agua o el aire puede ser usado para enfriamiento, dependiendo las condiciones del sitio. Si se usa enfriamiento húmedo, se debe disponer de agua de reposición. Debido a las impurezas químicas de la salmuera residual en general no es adecuada para utilizar en la torre de enfriamiento. Hay un amplio rango de fluidos de trabajo para el ciclo de potencia, para su selección se debe tratar de lograr el mejor aprovechamiento termodinámico a partir de las características del fluido geotérmico, en especial su temperatura. Hidrocarburos tales como el Isobutano, Isopentano y propano son buenos candidatos para ser usados como fluidos de trabajo al

igual que ciertos refrigerantes. El fluido de trabajo óptimo será el que proporcione más alta eficacia y una condición de operación segura y económica.

Las plantas tipo binarias son particularmente adecuadas para conformar paquetes modulares de 1 MW por unidad, estas unidades, son probadas en la fábrica ensambladas y embarcadas al sitio para rápida instalación en el campo. El diseño de este tipo de plantas permite que se puedan interconectar varias en el sitio del yacimiento para ajustarse al potencial del recurso.

3 MOTOR STIRLING

Se define motor *Stirling* como aquel dispositivo que convierte calor en trabajo mecánico (máquina térmica como motor) a través de un ciclo termodinámico¹² cerrado regenerativo, mediante compresión y expansión cíclicas del fluido de trabajo, operando dicho fluido entre dos temperaturas, la del foco caliente y la del foco frío. Con “ciclo cerrado” se quiere decir que el fluido de trabajo está permanentemente contenido dentro del sistema del motor, lo que también lo categoriza como un motor exotérmico, ya que el aporte de calor se realiza en el exterior de la máquina. Este calor puede ser aportado por casi cualquier fuente: química (aportada por combustión), solar, geotérmica y nuclear. “Regenerativo” se refiere al uso de un intercambiador interno de calor llamado ‘Regenerador’, el cual incrementa la eficiencia térmica del motor. El regenerador es un intercambiador de calor interno que tiene la función de absorber y ceder calor en las evoluciones a volumen constante del ciclo.

Su nombre es fruto de una evolución histórica, el primer nombre que recibieron estas máquinas fue el de motores de aire caliente porque sólo usaban aire caliente como fluido de trabajo. Posteriormente, el uso de otros gases provocó que se buscaran otros nombres, como motores de gas caliente, o bien, motores *Stirling*, en honor a Robert *Stirling*, quien junto a su hermano James, dieron un gran impulso al ciclo cerrado regenerativo.

El motor tuvo mucho auge a finales del siglo XVIII donde se usaban en vez de las peligrosas calderas usadas para impulsar las máquinas de vapor. Sin embargo, en el siglo XIX, al mejorar la seguridad y eficiencia asociada a las máquinas de vapor y con la introducción del motor eléctrico a finales de siglo, el motor *Stirling* fue siendo reemplazado poco a poco, y su desarrollo se dejó de lado. Solo a mediados del siglo XX se le volvió a dar especial interés cuando la compañía PHILIPS(27), consciente de sus beneficios desarrolló

¹² El ciclo termodinámico de *referencia* para esta máquina es el ciclo Stirling.

algunos motores para aplicaciones pequeñas con mucha mayor eficiencia que los anteriormente conocidos. Sin embargo, debido al alto costo el proyecto de renacimiento del motor *Stirling* se suspendió, y los motores construidos fueron donados a Universidades del mundo como objeto de investigación y desarrollo. Hoy, el motor *Stirling* puede recuperar gran importancia en la generación de energías limpias, y su desarrollo se ha acelerado en los últimos años como solución para la generación de energía y la descontaminación del planeta.

3.1 PARTES PRINCIPALES EN EL PROCESO MOTRIZ¹³

El motor *Stirling*, esquemáticamente presenta cinco partes principales, tal como se muestra en la Figura 21.

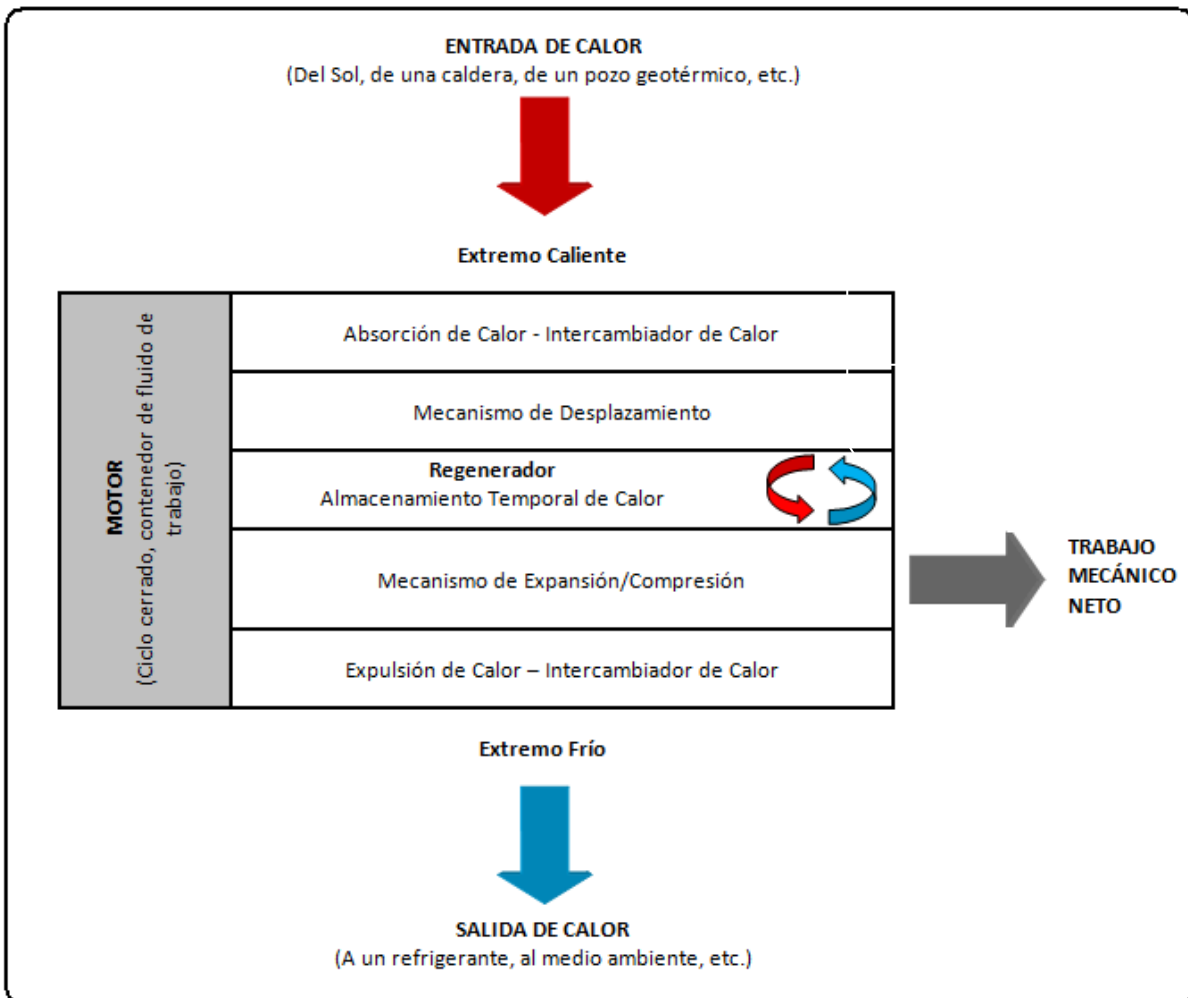
- a) Fluido de trabajo: debido a que es una máquina de ciclo cerrado, los procesos termodinámicos son realizados por un fluido de trabajo, generalmente un gas, permanentemente contenido dentro del sistema.
- b) Intercambiadores de calor: Dos intercambiadores de calor son usados para transferir calor a través de las fronteras del sistema. Uno que absorbe calor, transfiere el calor del exterior del sistema al fluido de trabajo, y otro que expelle el calor del fluido de trabajo al exterior del sistema. Por ejemplo, en un motor, el intercambiador que absorbe, pasa el calor de un quemador al gas de trabajo, y el intercambiador que expelle transfiere el calor del gas de trabajo a un sistema refrigerador en una camisa de agua.
- c) Mecanismo del desplazador: Mueve (o desplaza) el gas de trabajo entre el extremo caliente y el extremo frío de la máquina (a través del regenerador).
- d) Regenerador: Actúa de dos formas, como una barrera térmica entre los focos caliente y frío de la máquina, y también como un almacenador de energía térmica para el ciclo. Físicamente, un regenerador consiste de un material mallado o

¹³ Fuente: (29)

poroso. El calor es transferido a medida que el gas de trabajo se desplaza a través de la malla del regenerador. Cuando el gas de trabajo es desplazado desde el foco caliente de la máquina (a través del regenerador) al foco frío, el calor es “depositado en el regenerador, y la temperatura del gas de trabajo se reduce. Cuando el desplazamiento ocurre en el otro sentido, el calor es “sustraído” del regenerador y la temperatura del gas de trabajo aumenta.

- e) Mecanismo de expansión/compresión: Expande y/o comprime el gas de trabajo. En un motor este mecanismo produce una salida de trabajo neto.

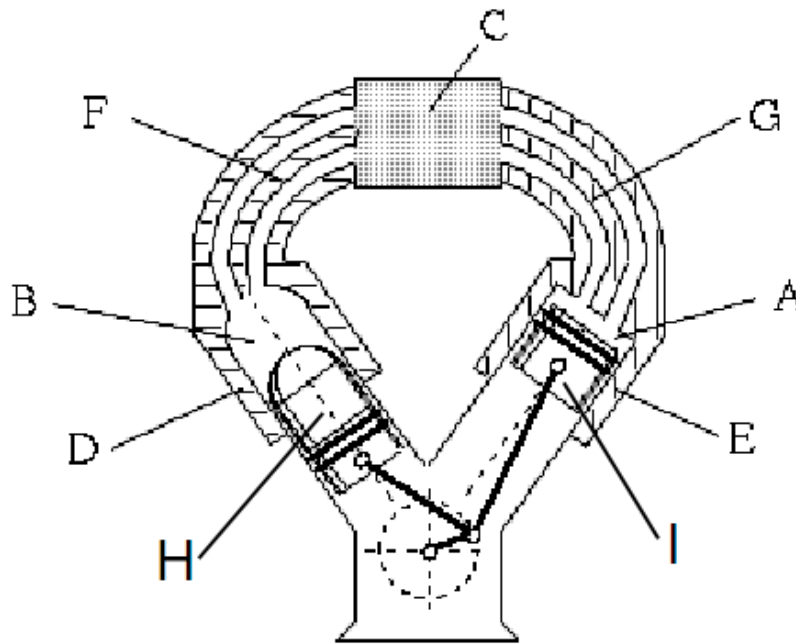
Figura 21. Diagrama de bloques de las principales partes de una máquina Stirling usada como motor



3.2 ELEMENTOS MECÁNICOS DEL MOTOR *STIRLING*¹⁴

Las soluciones mecánicas de los motores *Stirling* son diversas y cumplen un mismo esquema general como se aprecia en la Figura 21. La Figura 22 muestra un ejemplo de una posible configuración de un motor *Stirling*. Pueden observarse los elementos básicos del motor tal y como se disponen en realidad. (28)

Figura 22. Posible configuración de un motor *Stirling* real. Tomado de: (28)



En la Figura 22 se observa:

- A. Cámara de compresión
- B. Cámara de expansión
- C. Regenerador
- D. Intercambiador calentador
- E. Intercambiador refrigerador
- F. Calentador auxiliar
- G. Refrigerador auxiliar

¹⁴ Fuentes: (28) y (29)

- H. Pistón desplazador
- I. Pistón de potencia

En los siguientes apartados se analizan las posibles configuraciones y las características de los elementos mecánicos del motor.

3.2.1 Tipologías de motores

El cilindro es la materialización de la cámara de volumen variable. Un extremo está abierto hacia los intercambiadores de calor y el otro está cerrado por el émbolo, el cual determina las variaciones de volumen. La forma cilíndrica viene impuesta por la facilidad de construcción. El material suele ser metálico para una buena conducción térmica, y el grosor de la pared depende de la presión máxima del fluido de trabajo. El émbolo puede ser de tres tipos, según la función que tenga:

- a) Pistón
- b) Desplazador
- c) Mixto (pistón y desplazador)

Se habla de pistón o pistón de potencia cuando el émbolo debe resistir una diferencia elevada de presión entre sus dos caras, pero no ha de soportar, en cambio, ningún salto térmico apreciable entre el fluido de trabajo y el exterior. El pistón debe ser robusto y con buenos elementos de sellado para soportar la presión, por esto suele ser metálico. Las pérdidas por conducción térmica no representan ningún problema, porque son mínimas.

Un desplazador, en cambio, es un émbolo que trabaja con presiones muy parecidas en los dos lados, pero que ha de soportar un elevado gradiente térmico. Su resistencia y estanqueidad no son críticas, mientras que el aislamiento térmico sí lo es. Acostumbra a ser un elemento axialmente largo, que contiene material aislante en su interior. Sus paredes, metálicas, son delgadas para evitar la conducción, y tienen forma redondeada, para evitar concentraciones de tensión y fatiga del material (que se encuentra debilitado por la temperatura).

El émbolo mixto, o también pistón/desplazador, es aquel que ha de soportar un fuerte gradiente térmico acompañado de una elevada diferencia de presiones. Su diseño requiere un equilibrio entre aislamiento y resistencia, que a menudo es difícil encontrar.

Tabla 5. Diferenciación entre pistón, desplazador y émbolo mixto

Pistón	Gran ΔP	Pequeño ΔT
Desplazador	Pequeño ΔP	Gran ΔT
Mixto	Gran ΔP	Gran ΔT

Según la disposición de cilindros, pistones y desplazadores, los motores *Stirling* pueden clasificarse según se especifica en la siguiente sección.

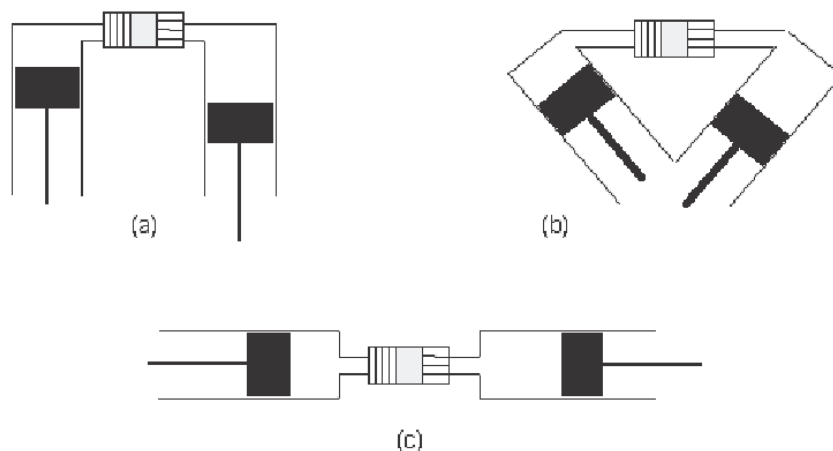
3.2.2 Tipologías de Arquitecturas

3.2.2.1 Arquitectura de émbolos de simple acción

La arquitectura de émbolos de simple acción se divide en tres grupos:

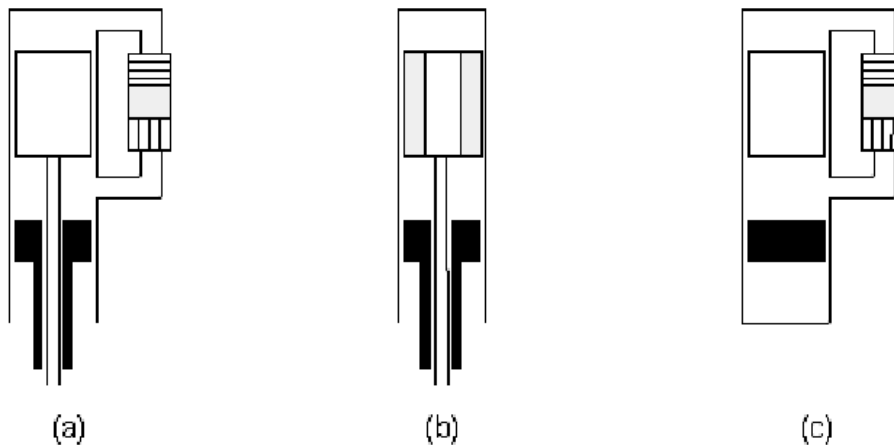
1. **Doble Pistón:** La arquitectura de doble pistón, también llamada **alfa (α)**, se caracteriza por presentar un émbolo que es un pistón y el otro un pistón/desplazador, que se mueven en dos cilindros diferentes. Generalmente se aplica a motores grandes, en que el peso no es un factor determinante.

Figura 23. Motores *Stirling* tipo α (de simple acción y doble pistón). Tomado de: (28)



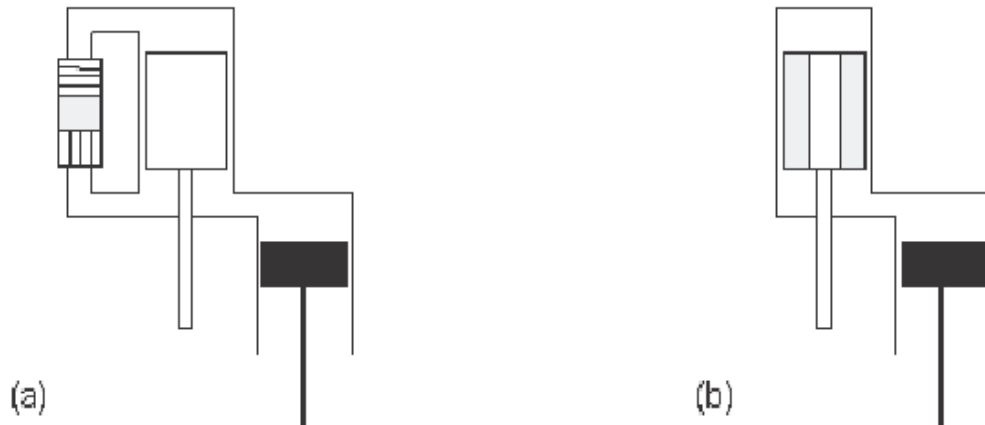
2. **Pistón-Desplazador:** En la configuración de pistón-desplazador uno de los émbolos es un pistón y el otro es un desplazador. Con esta configuración, la presión del fluido está soportada sólo por un pistón, que, además, trabaja a baja temperatura y reduce el problema de la estanqueidad. También al ser el desplazador más ligero que un pistón, se disminuye la masa oscilante y las vibraciones y en consecuencia, se reducen las dimensiones de cojinetes, bielas, etc. Es la configuración más utilizada en motores de poca potencia, aunque se utiliza en los de potencias superiores. Este tipo de configuración presenta dos alternativas:
- a. De cilindro único: Tipo **beta** (β). Reduce el espacio muerto al mínimo y da al motor máxima compacidad.

Figura 24. Motores *Stirling* tipo β (de simple acción con pistón y desplazador en cilindro único). Tomado de: (28)



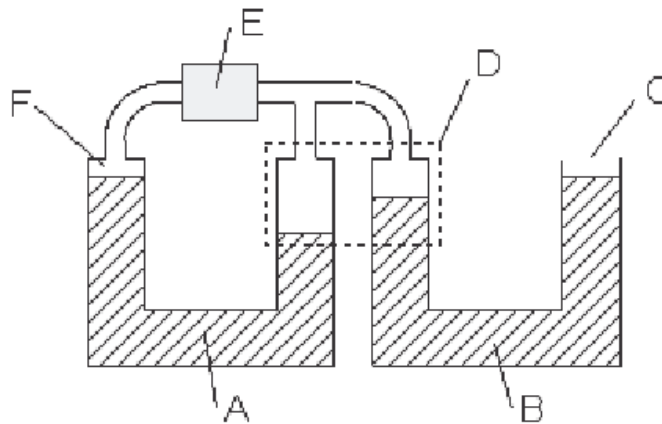
- b. De doble cilindro: Tipo **gamma** (γ). Ofrece más libertad en el diseño de la transmisión hacia un eje giratorio y facilita la construcción y el montaje.

Figura 25. Motores *Stirling* tipo γ de simple acción con pistón y desplazador en doble cilindro. Tomado de: (28)



3. **Pistón Líquido:** En estos motores los émbolos son superficies libres de un líquido. El gas de trabajo es impulsado y comprimido gracias al movimiento de la columna líquida a lo largo de los dos cilindros. Presentan muchas variantes constructivas, pero la mayoría sigue el esquema básico formado por dos columnas en U, una que actúa como desplazador y la otra como pistón. Tienen la ventaja de ser muy sencillos y económicos, pero presentan problemas de evaporación del líquido y de pérdidas de carga por fricción. En la Figura 26 se muestra un motor *Stirling* de pistón líquido, se observa: A- desplazador líquido, B- pistón líquido, C- salida de potencia, D- espacio frío, E- regenerador, F- espacio caliente.

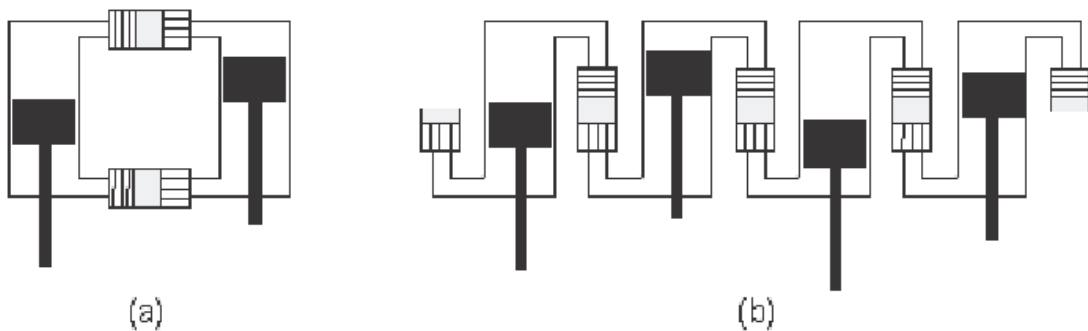
Figura 26. Motor *Stirling* de simple acción con pistón y desplazador líquidos. Tomado de: (28)



3.2.2.2 Arquitectura de émbolos de doble acción

En los que el elemento alternativo es un pistón/desplazador (mixto) que trabaja por las dos caras: uno comprime el gas de un ciclo mientras que el otro lo expande, o viceversa. En consecuencia, el número de ciclos termodinámicos coincide con el de cilindros y con el de émbolos, y siempre es más grande o igual a dos. Se trata, pues, de motores multiciclo. Presentan la ventaja de tener la mitad de piezas móviles que los de simple acción, cosa que facilita la estanqueidad y hace más económico el motor. Su inconveniente recae en la poca flexibilidad de diseño que ofrecen. Se aplican sobre todo para potencias superiores a 20 kW.

Figura 27. Motores *Stirling* de doble acción. Tomado de: (28)



3.3 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR *STIRLING*

El motor *Stirling* opera con fluido motor en un ciclo cerrado, obteniendo trabajo a partir de cuatro procesos cíclicos consecutivos: aporte de calor, expansión con el aporte calorífico de la fuente de calor, extracción de calor hacia un acumulador térmico regenerativo y compresión con extracción de calor hacia el foco frío. El ciclo ideal de referencia que describe el proceso de la máquina es el ciclo *Stirling*.

3.3.1 Ciclo *Stirling* (Ideal)

Los motores térmicos transforman un flujo de calor en trabajo mediante una serie de procesos termodinámicos que realizan de forma continuada sobre el fluido de un motor. En conjunto, estos procesos forman un ciclo termodinámico. Un ciclo termodinámico es

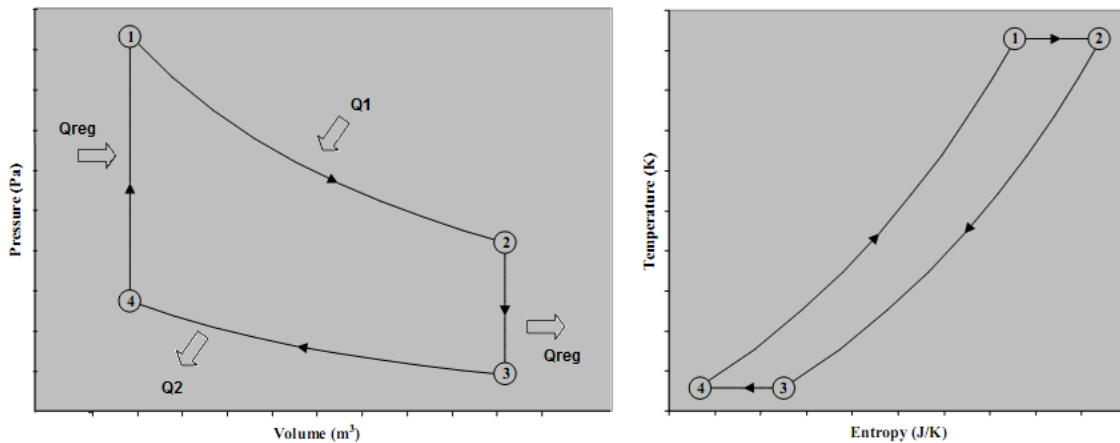
una evolución cíclica de procesos termodinámicos que se desarrollan dentro de un intervalo de temperaturas.

El ciclo termodinámico de rendimiento máximo es el ciclo de *Carnot*, cuyo rendimiento únicamente depende de la temperatura máxima y mínima que asume el fluido del motor. Este ciclo es de difícil implementación tecnológica, es considerado como el ciclo de referencia para la transformación máxima del flujo de calor en trabajo.

El ciclo *Stirling* es uno de los ciclos de referencia de la termodinámica, al decir de referencia, lo que se quiere indicar es que es un ciclo ideal; con gases perfectos, algunos componentes de la máquina se asumen cero volumen, la rapidez de los procesos es ideal, etc. Los procesos de evolución del ciclo se muestran en la Figura 28. Está compuesto por dos isotermas y dos isocoras¹⁵. Estas evoluciones son:

- a. 1 → 2: Expansión isotérmica con absorción de calor (Isoterma)
- b. 2 → 3: Extracción de calor de regeneración a volumen constante (Isocora)
- c. 3 → 4: Compresión isotérmica con extracción de calor (Isoterma)
- d. 4 → 1: Aportación de calor de regeneración a volumen constante (Isocora)

Figura 28. Diagramas P/V y T/S del ciclo *Stirling*. Tomado de: (29)

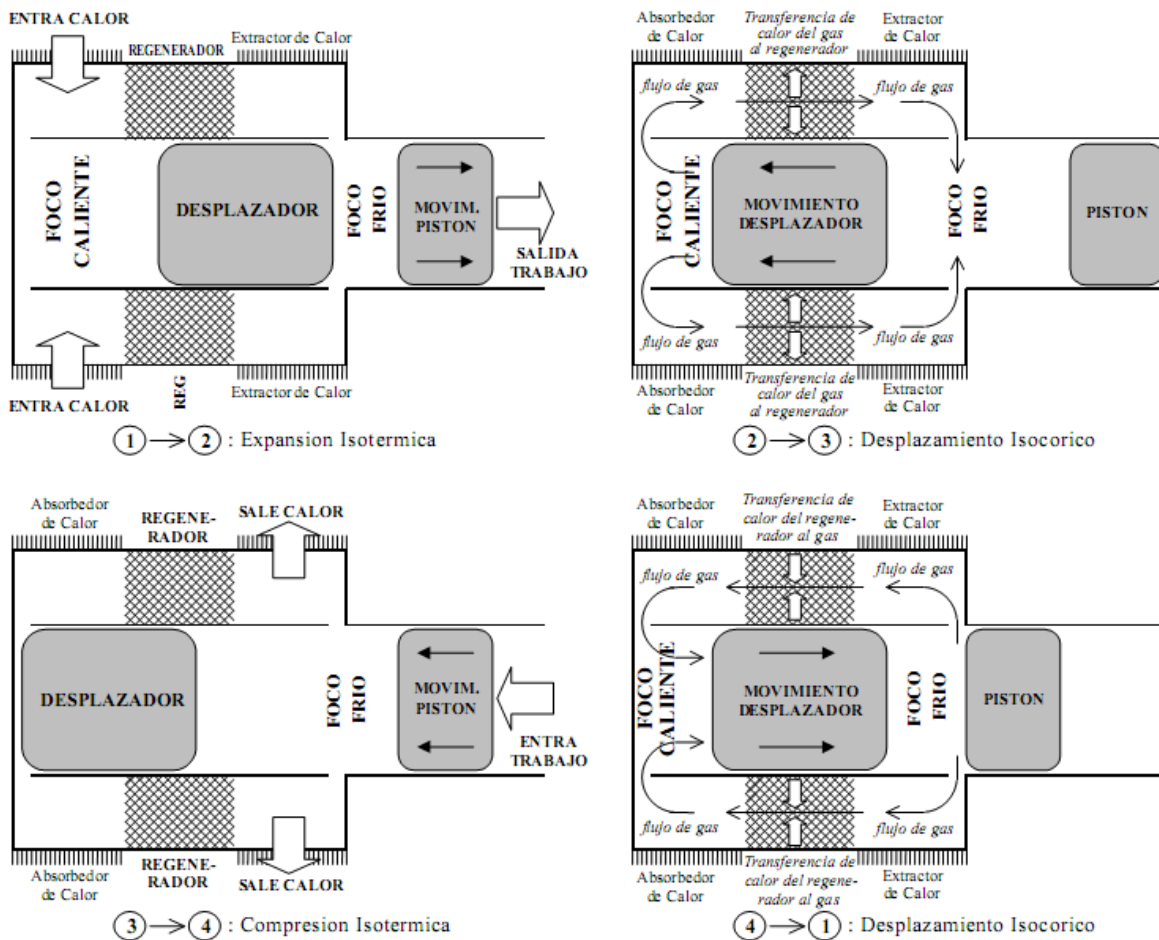


¹⁵ Las isotermas y las isocoras son procesos de evolución termodinámica o ciclos termodinámicos. Isoterma quiere decir proceso a temperatura constante e isocora quiere decir proceso a volumen constante

3.3.2 Motor Stirling Ideal

El esquema conceptual de un motor *Stirling* ideal (cumple el ciclo *Stirling* ideal) se muestra en la Figura 29 usando una configuración β sencilla y siguiendo las evoluciones de la Figura 28. Se debe anotar que para el motor *Stirling* ideal, los intercambiadores de calor, regenerador y conductos de transferencia, se asumen sin volumen.

Figura 29. Evoluciones termodinámicas del motor *Stirling* ideal en una configuración β . Tomado de: (29)



La Figura 29 se explica claramente a continuación:

Las evoluciones se pueden describir de la siguiente forma:

1 → 2: Expansión isotérmica: El gas de trabajo a alta presión absorbe calor del foco caliente a través del absorbedor de calor y se expande isotérmicamente, realizando trabajo sobre el pistón

2 → 3: Desplazamiento isocórico (a volumen constante): El desplazador transfiere todo el gas de trabajo de forma isocora a través del regenerador al foco frío de la máquina. El calor es absorbido del gas a medida que pasa por el regenerador, bajando así su temperatura. A medida que la temperatura se reduce, la presión decrece significativamente.

3 → 4: Compresión isotérmica: El pistón de potencia realiza el trabajo sobre el gas y lo comprime isotérmicamente en el foco frío de la máquina, así expeliendo calor del foco frío al exterior a través del sumidero (de calor). Debido a que el gas está a una presión baja, se requiere menos trabajo para la compresión del que fue obtenido por el gas durante la expansión (en 1 → 2), por lo tanto el ciclo presenta una salida de trabajo neto.

4 → 1: Desplazamiento isocórico: El pistón desplazador transfiere todo el gas de trabajo a volumen constante a través del regenerador hacia el extremo caliente de la máquina. El calor es entregado al gas a medida que pasa por el regenerador, elevando así su temperatura. A medida que la temperatura se eleva, la presión del gas se incrementa significativamente, y el sistema regresa a su estado inicial.

3.4 ANÁLISIS DEL MOTOR *STIRLING* IDEAL¹⁶

3.4.1 Trabajo neto realizado por el motor *Stirling* ideal

La conversión de energía térmica en trabajo mecánico, para el tipo de motor de ciclo cerrado y exotérmico, se realiza mediante el mecanismo de expansión-compresión, tal como se muestra en la Figura 21. Este trabajo, para una evolución de un punto 1 (P_1, V_1, T_1) a un punto 2 (P_2, V_2, T_2) se puede calcular mediante la expresión:

$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Ecuación 15

Si la evolución 1→2 es de expansión, el volumen aumenta y por ello dV es positivo y como P es siempre positiva, el trabajo realizado es positivo (trabajo entregado por el sistema o realizado contra fuerzas externas). Si la evolución hubiese sido al revés (2→1), el volumen disminuiría (compresión) y dV resultaría negativo por lo que el trabajo sería también negativo (trabajo realizado sobre el sistema, recibido por el sistema, realizado por fuerzas externas).

El trabajo neto realizado por el motor *Stirling* se puede evaluar por medio de la sumatoria del trabajo realizado en la expansión y el trabajo recibido en la compresión. Es pertinente aclarar que en las evoluciones isocoras no se realiza trabajo, sin embargo, sí se realiza una transferencia de calor. Este trabajo neto puede ser hallado mediante el diagrama Presión-Volumen (P/V) de la Figura 28, debido a que el trabajo realizado en una evolución isotérmica es el área bajo la curva, el trabajo neto corresponde al área encerrada entre las dos evoluciones isotérmicas. Este trabajo neto se puede hallar mediante la expresión:

¹⁶ Fuente: (28)

$$W_{NETO} = W_{1 \rightarrow 2} - W_{3 \rightarrow 4} = \int_{V_1}^{V_2} P dV + \int_{V_3}^{V_4} P dV$$

Ecuación 16

Considerando la ecuación de estado para gases ideales:

$$PV = mRT$$

Ecuación 17. Ecuación de estado para gases ideales

Donde R es la constante particular del gas ideal empleado como fluido de trabajo, y notando que en un proceso isotérmico T es constante y para un ciclo cerrado m es constante, la expresión para el trabajo hecho durante un proceso isotérmico de A hasta B se puede formular así:

$$W = \int_{V_A}^{V_B} \frac{mRT}{V} dV = mRT [\ln V]_{V_A}^{V_B} = mRT \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$$

Ecuación 18

Ahora sustituyendo el resultado de la Ecuación 18 en la Ecuación 16 se puede evaluar el trabajo neto:

$$W_{NETO} = mRT_H \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) + mRT_L \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right)$$

Donde T_H y T_L son las temperaturas alta y baja respectivamente de las isothermas. Esta ecuación puede ser simplificada teniendo en cuenta que $V_4 = V_1$ y $V_3 = V_2$, así pues se obtiene la siguiente expresión:

$$W_{NETO} = mR \ln \left[\frac{V_2}{V_1} \right] (T_H - T_L)$$

Ecuación 19. Trabajo neto realizado por el motor *Stirling*

El trabajo neto representa la energía que sale del sistema, lo que se verifica por inspección del diagrama P/V de la Figura 28, ya que el sentido del ciclo sigue la dirección de las agujas del reloj, lo que implica que el trabajo neto es positivo y opera como motor.

Por inspección de la Ecuación 19, tras un simple análisis, se observa que el trabajo neto del motor *Stirling* puede ser incrementado maximizando el diferencial de temperatura entre los focos caliente y frío ($T_H - T_L$), la relación de compresión (V_2/V_1), la masa del gas (y por lo tanto, el volumen de la máquina y/o la presión media de operación), o la constante particular del gas (escogiendo un gas con una constante particular mayor).

3.4.2 Transferencia de calor en un motor *Stirling* ideal

La cantidad de calor intercambiada por el motor *Stirling* corresponde al área encerrada por la curva del ciclo *Stirling* en el diagrama T/S de la Figura 28. Debido a que la transferencia de calor que aporta el regenerador en las evoluciones isocoras al ciclo es totalmente interna, es decir, que el calor aportado en la evolución 4→1 ($Q_{4→1}$) es igual al cedido en la evolución 2→3 ($Q_{2→3}$), para evaluar el calor transferido desde y hacia el sistema se considera únicamente los procesos isotérmicos.

Ahora bien, el calor aportado en el proceso a alta temperatura es:

$$Q_1 = Q_{1→2} = \int_{S_1}^{S_2} T_H dS$$

Ecuación 20

Esta integral puede ser evaluada con mayor facilidad considerando el primer y el segundo principio de la termodinámica.

De la primera ley se sabe que:

$$dQ = dU + dW = dU + PdV$$

Ecuación 21

Y de la segunda se sabe que:

$$dQ = TdS$$

Ecuación 22

De la combinación de la primera y segunda ley se puede decir que:

$$TdS = dU + PdV$$

Ecuación 23

Debido a que la energía interna (U) depende exclusivamente de la temperatura, y dado que se está realizando una evolución isotérmica, la diferencia de energía interna es cero ($dU=0$). Así entonces la Ecuación 20 queda:

$$Q_{1\rightarrow 2} = \int_{V_1}^{V_2} P dV = W_{1\rightarrow 2}$$

Ecuación 24

Entonces el calor aportado a la evolución 1→2 es:

$$Q_1 = Q_{1\rightarrow 2} = mRT_H \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Ecuación 25. Calor de entrada al motor *Stirling*

Y el calor extraído del motor en la evolución 3→4 es:

$$Q_2 = Q_{3\rightarrow 4} = mRT_L \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Ecuación 26. Calor de salida del motor *Stirling*

3.4.3 Eficiencia del motor *Stirling* ideal

La eficiencia de cualquier máquina térmica está definida como la relación entre el trabajo neto y el calor de entrada:

$$\eta = \frac{W_{NETO}}{Q_1}$$

Ecuación 27

Entonces, para el motor *Stirling*, la eficiencia puede ser calculada de la Ecuación 19 y de la Ecuación 25 así:

$$\eta_{STIRLING} = \frac{mR \ln\left[\frac{V_2}{V_1}\right] (T_H - T_L)}{mRT_H \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

$$\eta_{STIRLING} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

Ecuación 28. Eficiencia del motor *Stirling* ideal

Esto demuestra el interesante hecho de que la eficiencia de un motor *Stirling* ideal sólo depende de la temperatura y de ningún otro parámetro.

Vale la pena revisar la eficiencia del ciclo de Carnot para una máquina térmica:

$$\eta_{CARNOT} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

Ecuación 29. Eficiencia del ciclo de *Carnot*

Entonces se puede observar fácilmente que:

$$\eta_{STIRLING} = \eta_{CARNOT}$$

Ecuación 30

En otras palabras, el motor *Stirling* tiene la máxima eficiencia posible según la segunda ley de la termodinámica (al igual que la máquina de *Carnot*). Sin embargo, se debe notar que a diferencia de la máquina de *Carnot*, el motor *Stirling* es una máquina real que es capaz de producir cantidades útiles de trabajo.

3.5 ANÁLISIS DEL MOTOR *STIRLING* REAL¹⁷

Como se puede ver, hasta este punto se ha tenido en cuenta el motor *Stirling* ideal. El motor *Stirling* real se diferencia del ideal en algunos aspectos:

- a. Al regenerador y a los intercambiadores de calor de la máquina *Stirling* real sí tienen volumen a diferencia de los de la máquina ideal.
- b. El movimiento del pistón es usualmente senoidal en vez de discontinuo, llevando a la manipulación no óptima del gas de trabajo.
- c. Los procesos de expansión y compresión en el motor *Stirling* real son más bien politrópicos en vez de isotérmicos. Esto causa fluctuaciones en la presión y

¹⁷ Fuente: (28)

temperatura en el gas de trabajo lo que resulta en procesos adiabáticos y pérdidas transitorias de calor.

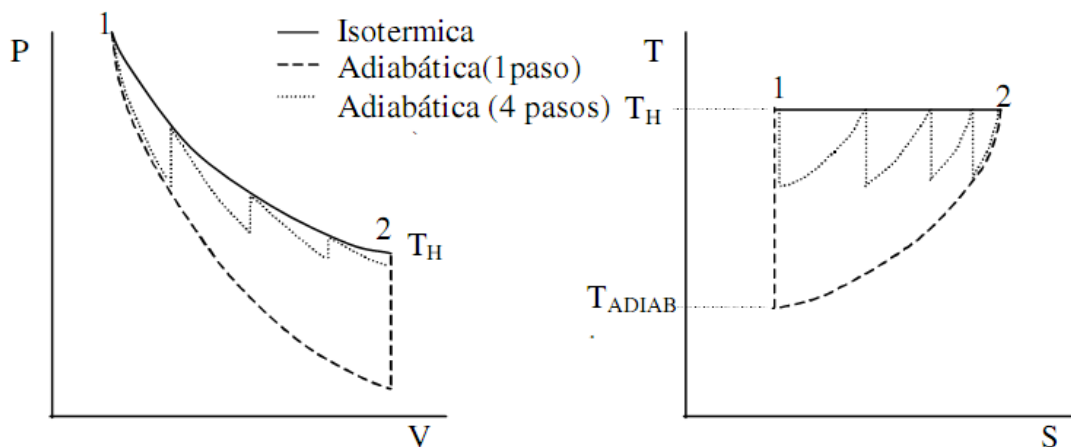
- d. Se presentan pérdidas debido a fricción del gas durante el desplazamiento, particularmente durante el flujo a través del regenerador.
- e. Otros factores como la transferencia de calor entre los focos frío y caliente de la máquina, problemas de sellamiento, no pureza de los gases y la fricción en los mecanismos móviles causan que el comportamiento de la máquina *Stirling* real difiera del comportamiento ideal.

Aunque el motor *Stirling* teóricamente tiene la eficiencia de *Carnot*, los factores antes mencionados tienden a reducir el rendimiento de las máquinas reales. Sin embargo el funcionamiento es bien parecido al ideal.

3.5.1 Evoluciones isotérmicas vs. Evoluciones adiabáticas

Las evoluciones isotérmicas sólo pueden realizarse cuando la velocidad del motor es muy baja, en caso contrario estas transformaciones tienden a hacerse adiabáticas. Para poder valorar la influencia de esta desviación respecto a la isoterma sobre rendimiento y trabajo, se considera el caso de la Figura 30, en donde se analiza una expansión, desde el punto 1 hasta el punto 2, que se encuentran a la misma temperatura, y los posibles caminos por los que se puede hacer.

Figura 30. Posibles transformaciones para la expansión de 1 a 2. Tomado de: (28)



En la Figura 30 se observa el recorrido hecho por una transformación isotérmica, una adiabática de un paso y una transformación adiabática de 4 pasos. La razón por la cual, las evoluciones adiabáticas vuelven a la temperatura T_H , se debe a que durante el proceso de expansión se sigue aportando calor al gas de trabajo, este aporte se realiza a volumen constante. En general, el número de pasos y el comportamiento de la transformación depende de la velocidad de la máquina, de la cantidad de calor aportada (o expelida) por el intercambiador, el tipo de gas, y en mayor medida de la cilindrada y la presión máxima.

El calor aportado durante una expansión isoterma es igual al trabajo realizado por la transformación, viene dado por la siguiente expresión:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = mRT_H \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Ecuación 31

El calor equivalente en una expansión adiabática realizada según un paso se tiene que calcular en base a la temperatura final de la transformación adiabática, pues el calor corresponderá al restablecimiento de la temperatura de la fuente a volumen constante (transformación isocora).

$$T_{adiab 1} = T_H \left(\frac{V_i}{V_f} \right)^{k-1}$$

Ecuación 32

$$Q_{adiab 1} = mC_V(T_H - T_{adiab 1})$$

Ecuación 33

Para el caso de la transformación adiabática con más pasos, las expresiones son las mismas de la Ecuación 32 y la Ecuación 33, pero aplicadas a volúmenes menores.

Tras un análisis de la Ecuación 31 y de la Ecuación 33, y tomando en cuenta los procesos adiabáticos de varios pasos, se llega a la conclusión que el calor aportado isotérmicamente es máximo, y que el caso más desfavorable es una transformación adiabática de un paso, y que cuantos más pasos tenga la adiabática más próximo se está de la transformación isoterma. En la Tabla 6 se muestra el cálculo realizado para hallar el

calor aportado para el caso específico de un motor de 100 cm^3 , de Helio, con un volumen mínimo de 100 cm^3 y un volumen máximo de 200 cm^3 .

Tabla 6. Calor aportado en función del tipo de transformación. Tomado de: (28)

Tipos de transformación	Calor (J)
1 etapa adiabática	138,9
5 etapas adiabáticas	165,34
10 etapas adiabáticas	169,29
100 etapas adiabáticas	172,96
1000 etapas adiabáticas	173,3
Isotérmica	173,3

Según los resultados presentados en la Tabla 6, se deduce que un comportamiento totalmente adiabático implica una pérdida de calor importante. Pero se puede considerar que durante la transformación adiabática la temperatura no se aleja excesivamente de la temperatura máxima. Este comportamiento se podría asimilar a diversas transformaciones adiabáticas seguidas del mismo número de aportaciones de calor a volumen constante. En este caso, con pocas etapas el calor perdido se reduce ya de forma importante. Por lo tanto se considera que para valorar la potencia del motor, el trabajo adiabático es un buen dato de referencia, pero sólo para marcar un límite, debido a que el comportamiento es mucho más próximo al trabajo desarrollado según una isoterma.

3.5.2 Análisis de la relación de compresión

La relación de compresión afecta de forma fundamental al rendimiento y el trabajo del motor *Stirling*; sin embargo, es necesario aclarar que los rendimientos son invariables respecto a la presión máxima y la cilindrada. En la Figura 31 se observa el rendimiento de la máquina en función de la relación de compresión, para el caso específico de un motor que trabaja con Helio, con cilindrada de 100 cm^3 y una presión máxima del ciclo de 100 Bar. Se observa que el rendimiento aumenta con la relación de compresión para el caso ideal. Sin embargo, al realizar la expansión y la compresión según una adiabática de un

paso (el caso más desfavorable y menos probable), se observa como el rendimiento cae con el aumento de la relación de compresión.

La evolución del trabajo neto frente a la relación de compresión se muestra en la Figura 32 para el mismo caso específico del análisis del rendimiento (Helio, 100 Bar y 100 cm³). La evolución del trabajo no depende del fluido cuando la compresión y la expansión se realizan isotérmicamente y siempre disminuye con el aumento de la relación de compresión. Sin embargo, sí se realiza la compresión y expansión en etapas adiabáticas, el trabajo disminuye de forma notable y sí influyen las características del fluido. El trabajo tiende a ser infinito para una relación de compresión de 1. Este hecho viene dado por las expresiones utilizadas, de manera que para tener una relación de compresión de 1 con una determinada cilindrada se necesitaría de volúmenes infinitos, por lo tanto, la masa del gas también se haría infinita. Así entonces, las fórmulas pierden sentido cuando la relación de compresión se aproxima a 1. Por otro lado, para la relación de compresión infinita, el trabajo se haría 0, ya que la masa sería 0.

3.5.3 Análisis del salto térmico

El salto de temperatura entre las dos fuentes afecta tanto al rendimiento como al trabajo del ciclo, aumentándolos cuanto más grande sea el salto térmico. Sin embargo, una variación de la temperatura máxima no afecta tanto como un incremento de la temperatura mínima. Este concepto se puede apreciar con claridad en la Figura 33 y la Figura 34, en las que se representa el rendimiento y el trabajo respectivamente en función del salto térmico y para diferentes temperaturas iniciales¹⁸. El ciclo de las figuras es el *Stirling*. De las figuras además se observa que para igual salto térmico, cuanto más baja sea la temperatura del foco frío, el ciclo dará más rendimiento y trabajo. Según esto, se necesita tener más cuidado controlando la temperatura inferior que la superior.

¹⁸ En las figuras se muestra la temperatura en grados absolutos o Kelvin. La equivalencia entre grados Kelvin y Celsius está dada por: °K = °C + 273.

Figura 31. Rendimiento en función de la relación de compresión en el ciclo *Stirling*. Tomado de: (28)

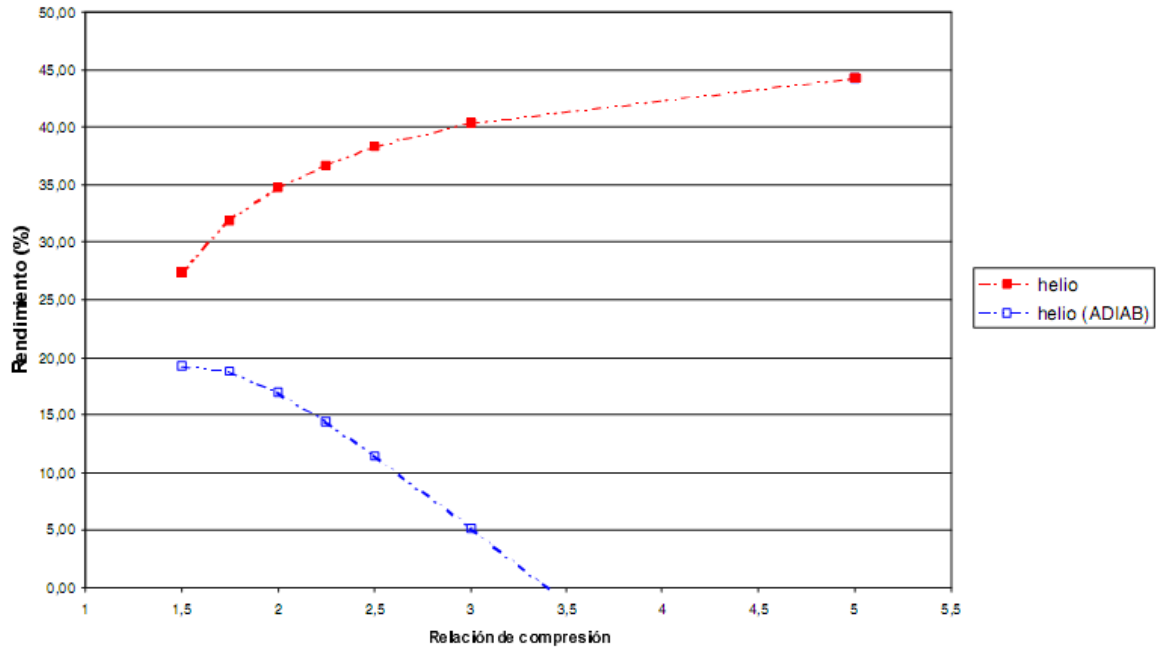


Figura 32. Trabajo neto en función de la relación de compresión en el ciclo *Stirling*. Tomado de: (28)

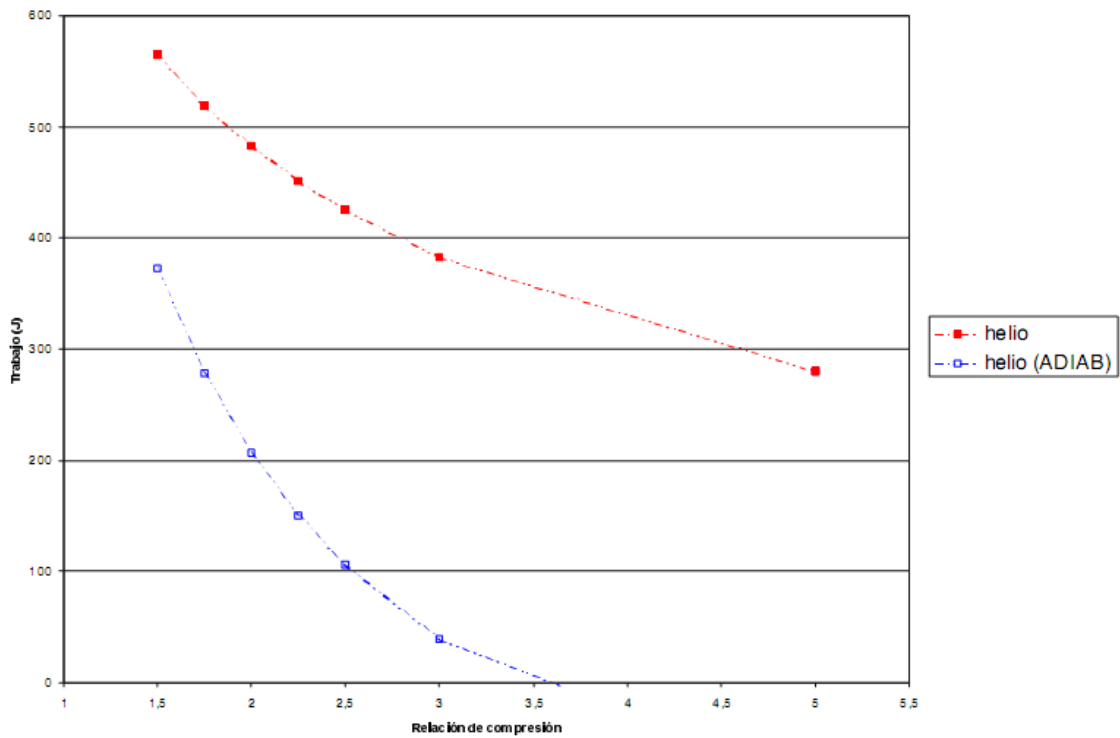


Figura 33. Rendimiento en función del salto térmico para diferentes temperaturas de la fuente fría. Tomado de: (28)

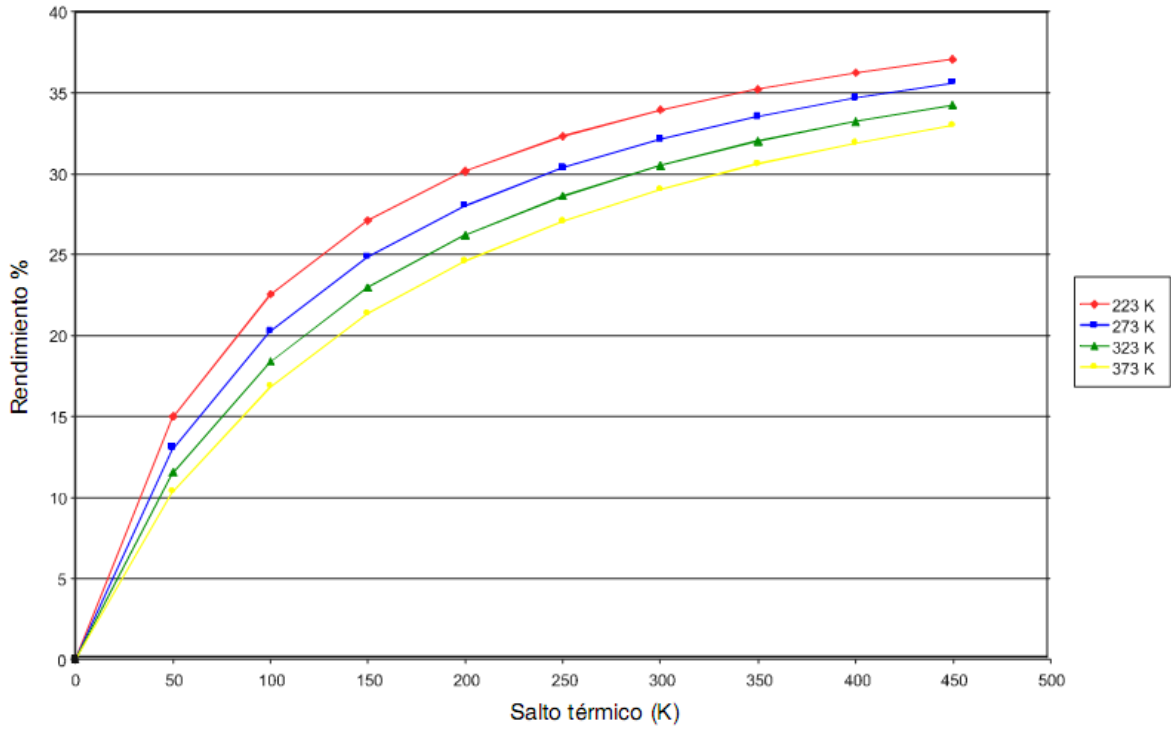
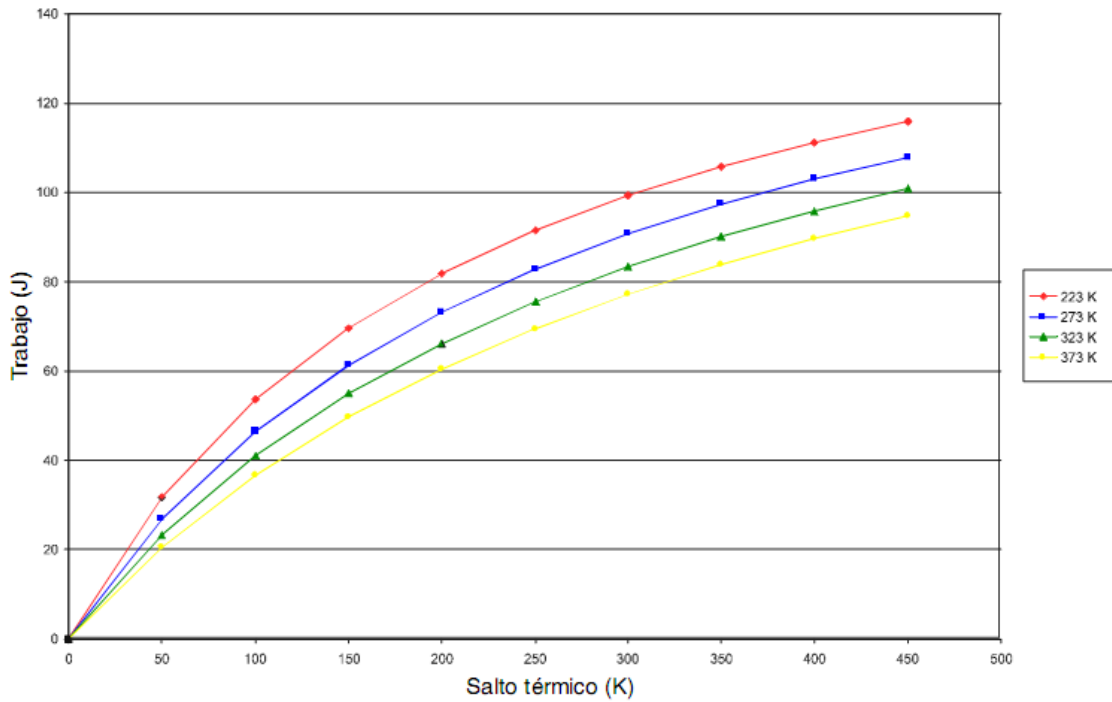


Figura 34. Trabajo en función del salto térmico para diferentes temperaturas de la fuente fría. Tomado de: (28)



3.5.4 Análisis de los fluidos de trabajo

Los fluidos de trabajo en fase gaseosa son los más estudiados y empleados en los motores *Stirling*. Una de las razones de por qué el Hidrógeno y el Helio son usados más a menudo como gas de trabajo en motores *Stirling* de gran tamaño se puede deducir por inspección de los valores para las constantes particulares de los gases dadas en la Tabla 7 y de la Ecuación 34, que se usa para calcular el trabajo neto realizado por el motor *Stirling*.

Tabla 7. Constantes particulares para una variedad de gases a 300 °K. Tomado de: (29)

Gas	Constante Particular del Gas, R (J/kg °K)
Aire	319,3
Amoníaco	488,2
Dióxido de Carbono	188,9
Helio	2077,0
Hidrógeno	4124,2
Nitrógeno	296,8
Propano	188,6
Vapor	461,5

$$W_{NETO} = mR \ln \left[\frac{V_2}{V_1} \right] (T_H - T_L) = nR' \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) (T_H - T_L)$$

Ecuación 34. Trabajo neto realizado por el motor *Stirling*

Donde n es el la masa molar y R' es la constante universal para los gases.

3.5.5 Curvas características

Una primera aproximación del valor de la potencia que puede desarrollar un motor *Stirling* viene dada por la fórmula de Beale. Las constantes dadas en la Tabla 8 son una media a partir de muchos motores reales. La expresión es la siguiente:

$$P = B \cdot P_m \cdot f \cdot V$$

Ecuación 35. Fórmula de Beale

Donde:

P : Potencia del motor (W)

B : Número de Beale (ver Tabla 8)

P_m : Presión media del ciclo (Bar)

f : Frecuencia de funcionamiento (Hz)

V : Volumen barrido por el pistón (cm³)

Tabla 8. Número de Beale según la temperatura del calentador. Tomado de: (28)

Temperatura del calentador	600 °K	800 °K	1 000 °K	1 200 °K
No. Beale (motor bien diseñado)	0,008	0,017	0,025	0,030
No. Beale (motor poco optimizado)	0,002	0,006	0,009	0,010

Esta relación es útil para cálculos preliminares y estudios de viabilidad. También es interesante conocer qué niveles se mueve el rendimiento de los motores *Stirling* reales.

La utilidad de un motor térmico es convertir energía calorífica en trabajo mecánico. Por eso, conocer sus prestaciones significa saber cuánta energía consume y cuánto trabajo genera por unidad de tiempo, o lo que es lo mismo: conocer la potencia mecánica (P) y el rendimiento (η).

Las prestaciones P y η del motor *Stirling* están en función de las condiciones de trabajo que se le imponen. Son las *variables de funcionamiento*.

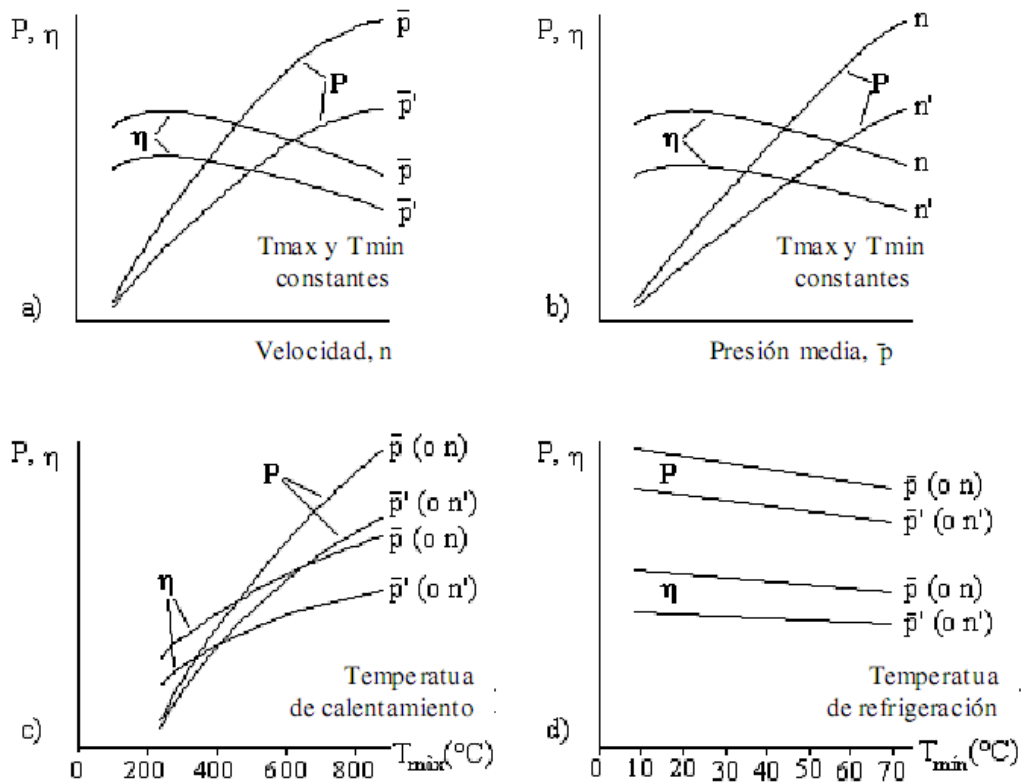
- a. Velocidad (n): El incremento de velocidad, produce un incremento proporcional en la potencia de la máquina a bajas velocidades, sin embargo, a altas velocidades, las

pérdidas aumentan y la potencia empieza a crecer en menor valor. El rendimiento por su parte, ya que aumentan sus pérdidas con la velocidad, se reduce en mayor cantidad el rendimiento con el aumento de la velocidad.

- b. Presión media (p_{med}) o presión máxima (P_{max}): El efecto de la presión del fluido de trabajo sobre la potencia y el rendimiento es casi el mismo que el da la velocidad. Idealmente la potencia (P) tendría que ser proporcional a la presión, y η independiente; pero las pérdidas provocadas por el aumento de la presión (p) modifican estas relaciones tal y como lo hace la velocidad. Habrá una presión de P_{max} y una de η_{max} , entre las cuales es conveniente trabajar ($p[\eta_{max}] > p[P_{max}]$).
- c. Temperatura del calentador (T_{max}): Es evidente que cuanto más alta sea la temperatura, más intercambio térmico habrá, y por lo tanto, se generará más potencia. También está claro que el aumento de temperatura eleva el rendimiento ideal, y en consecuencia el η real del motor crece.
- d. Temperatura del refrigerador (T_{min}): Una disminución en la temperatura del refrigerador, resulta en mayor intercambio de calor desde el interior, lo que resulta en un aumento en la potencia y el rendimiento.

En la Figura 35 se explica gráficamente cada uno de los puntos anteriores, en la parte a) se muestra el efecto de la velocidad a diferentes niveles de presión media, en la b) se muestra el efecto de la presión media del fluido de trabajo a diversas velocidades, en c) se muestra el efecto de la temperatura del calentador a diversas velocidades o presiones medias y en d) se muestra el efecto de la temperatura del refrigerador a diversas velocidades o presiones medias.

Figura 35. Influencia de los principales parámetros de funcionamiento sobre las prestaciones del motor. Tomado de: (28)

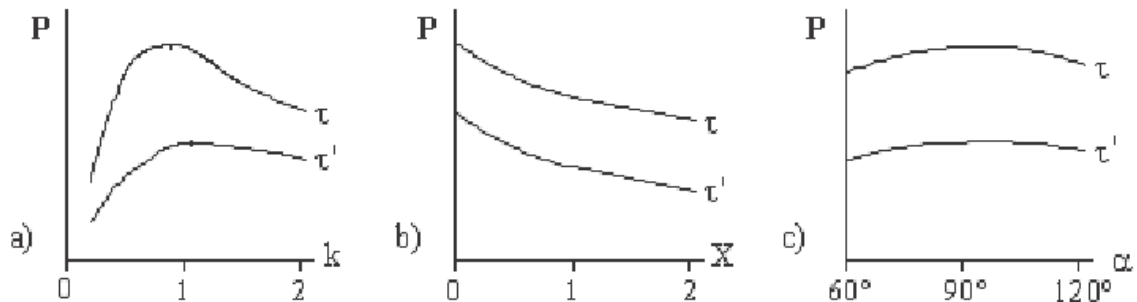


El efecto de todos estos parámetros o variables de funcionamiento, y también de los que vienen a continuación se han analizado manteniendo los demás constantes. Las prestaciones P y η del motor *Stirling* están también en función de los parámetros que definen la configuración del motor. Son las *variables de diseño*:

- Cilindrada: En los motores *Stirling* se puede llamar cilindrada a la diferencia entre los volúmenes máximo y mínimo a que se somete todo el fluido de trabajo en cada ciclo. La relación de la cilindrada con la potencia desarrollada es lineal (pero no proporcional). El rendimiento en cambio no se tendría que ver afectado por este parámetro, pero la experiencia demuestra que esto no es cierto.
- Relación de volúmenes barridos (k): Es la relación entre el volumen barrido por el émbolo de compresión y el de barrido por el de expansión. La potencia presenta un máximo para valores de k entre 0,8 y 1, en función de otros parámetros.

- c. Relación carrera/diámetro (s/D): Suele encontrarse alrededor de 0,5 tanto para la cámara de expansión como para la de compresión. Se trata de una constitución muy calculada que favorece el intercambio térmico y reduce las dimensiones de un posible cigüeñal y del motor en general, a pesar de que dificulta el diseño.
- d. Relación de volumen muerto (X): Es la relación entre el volumen muerto (no barrido) y el volumen de la cámara de expansión. El aumento del espacio interior del regenerador y los intercambiadores auxiliares (aumento de X) afecta negativamente la potencia. Se debe diseñar con un factor X tan bajo como sea posible.
- e. Ángulo de desfase (α): El movimiento de los émbolos de un motor *Stirling* suele ser senoidal, con la misma frecuencia, pero con un cierto desfase α . La potencia presenta un máximo para los valores de α entre 60° y 120° , según el motor.

Figura 36. Influencia de algunos parámetros de diseño sobre la potencia del motor, a una velocidad y una presión determinada. Tomado de: (28)



La Figura 36 muestra algunos de estos efectos sobre la potencia, en forma de gráficos univariantes. Para la Figura, se han graficado las curvas para una velocidad y una presión determinadas, y a dos niveles de τ (relación de temperaturas = T_{min}/T_{max}) $\tau=0,25$ y $\tau=0,5$. En la parte a) se muestra el efecto del factor de volumen barrido ($k=V_{compr}/V_{expan}$). El valor óptimo de k depende de la temperatura, en b) se muestra el efecto de la relación de volumen muerto ($X= k=V_{muerto}/V_{expan}$), y en c) el efecto del ángulo de desfase α .

Estos gráficos son insuficientes cuando se requiere un diseño más fino, para esto existen unas cartas de diseño que permiten trabajar con diversas variables a la vez. De todas formas, un desarrollo riguroso exige un estudio personalizado de cada motor con la ayuda de herramientas computacionales.

4 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL MOTOR *STIRLING* – ENERGÍA SOLAR

La generación de energía eléctrica a partir de la energía solar usando el motor *Stirling* se obtiene mediante la concentración de radiación solar directa (energía solar térmica), aprovechando esta concentración se pueden obtener muy altas temperaturas, las cuales se usan como fuente de calor primaria, necesaria para el funcionamiento del motor *Stirling*.

4.1 SISTEMA DISCO-*STIRLING*

Los sistemas Disco-*Stirling* son unidades de generación de pequeña capacidad. La capacidad de una unidad se encuentra típicamente entre 5 y 25 kW, sin embargo, en este momento se encuentra en desarrollo unidades de hasta 50 kW. Por su tamaño y modularidad, el sistema es apto para aplicaciones flexibles. Son ideales en funcionamiento aislado para pequeños consumos locales; en grupos también, ya sea para el consumo de una pequeña población o incluso para la generación de potencia para un sistema interconectado. De todas las tecnologías solares existentes, el sistema Disco-*Stirling* ha demostrado obtener la mayor eficiencia en la conversión energía solar-energía eléctrica con un 31,25% (30), por lo cual tiene el potencial de convertirse en una de las fuentes renovables de energía menos costosas.

En el mundo se han realizado varias aproximaciones y ensayos con el objetivo de llevar esta tecnología hasta la etapa de comercialización, sin embargo todos los sistemas funcionan con base en el mismo principio, y aunque con diferencias en el diseño se usan los mismos componentes principales.

4.1.1 Partes principales de un sistema disco-*Stirling*

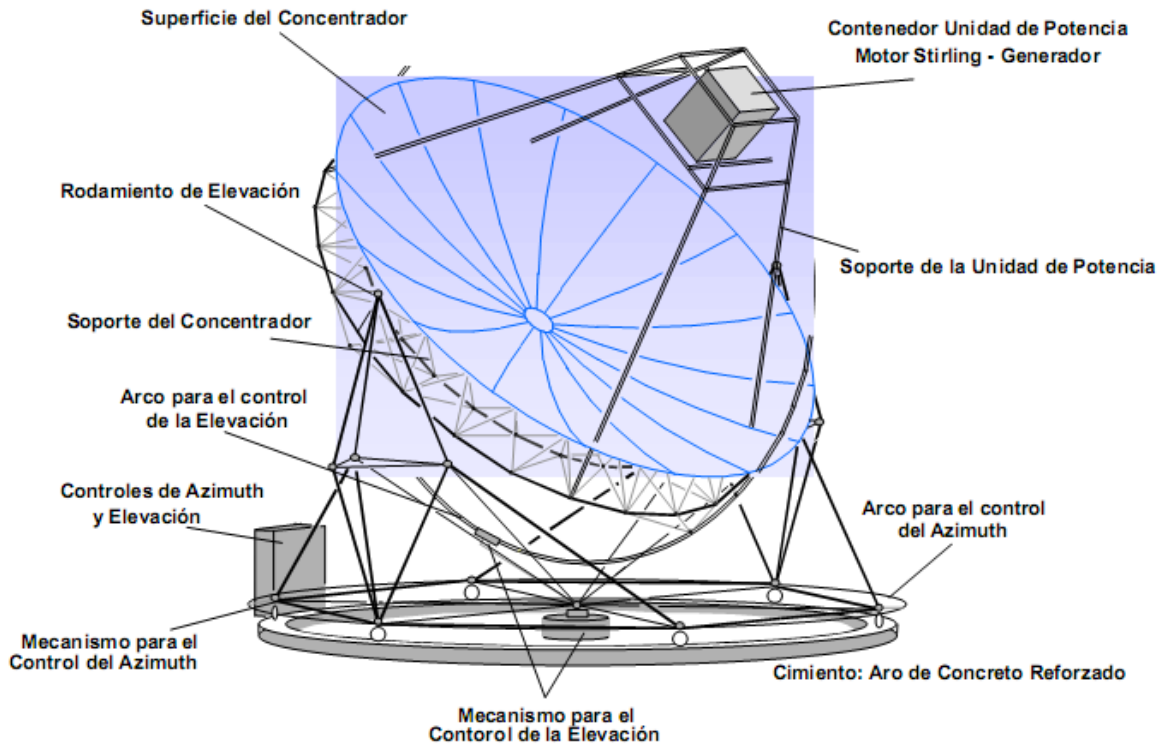
Un sistema Disco-*Stirling* típico se presenta en la Figura 37. Esencialmente, el sistema consiste de los siguientes componentes principales (31):

- Concentrador solar parabólico

- Sistema de seguimiento
- Intercambiador solar (receptor)
- Motor *Stirling* y generador (*conversion power unit*)

El concentrador parabólico refleja la radiación solar directa en una cavidad receptora que está localizada en el punto focal del concentrador parabólico, obteniéndose así un mapa de energía solar concentrada. La radiación solar es absorbida por el intercambiador solar y por consiguiente calienta el gas de trabajo (generalmente helio o hidrógeno) del motor *Stirling* a temperaturas de aproximadamente 650 °C (dependiendo de la cantidad de radiación solar directa disponible en el lugar y el tamaño del concentrador). Este calor es convertido en trabajo mecánico por el motor *Stirling*. El uso del motor *Stirling* en esta aplicación presenta dos ventajas: Es de combustión externa, por lo que el aporte energético puede realizarse mediante la luz solar reflejada por el disco parabólico; es un ciclo de alto rendimiento termodinámico. Un generador directamente acoplado al cigüeñal del motor *Stirling* (dentro de un mismo contenedor) convierte esta energía mecánica en energía eléctrica. Para mantener reflejada la radiación solar constantemente sobre el punto focal del concentrador parabólico durante el día, un sistema rastreador del Sol o de seguimiento hace rotar continuamente el concentrador alrededor de dos ejes para seguir la trayectoria solar durante el día.

Figura 37. Estructura de un sistema Disco-Stirling. Tomado de: (31)



4.1.1.1 Concentrador solar

Generalmente hablando, el concentrador entrega el “combustible” para el motor *Stirling*. El concentrador, que tiene forma parabólica, refleja y concentra la radiación solar directa en el punto focal, como se muestra en la Figura 38.

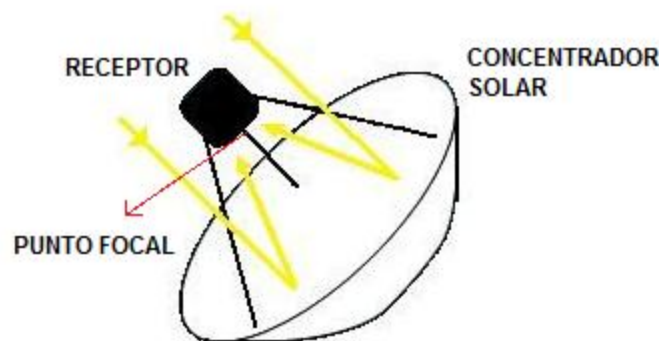
Los concentradores usan una superficie reflectiva de aluminio o plata, depositada en vidrio o plástico. Las superficies reflectivas más durables han demostrado ser los espejos de plata/vidrio.

Debido a que los discos concentradores tienen distancias focales cortas, son requeridos espejos de relativa delgadez (espesor de aproximadamente 1mm) para acomodarse a las curvaturas requeridas. Adicionalmente es deseado que el vidrio tenga un bajo contenido de hierro para mejorar la reflectancia. Dependiendo del espesor y del contenido de hierro,

los espejos solares de plata tienen valores de reflectancia solar en el rango de 90 a 94% (30).

Una innovación en el diseño de concentradores solares es el uso de membranas tensionadas, en las cuales una membrana reflectiva es estirada a través de un aro o soporte circular. Mediante un método de vacío parcial se logra la curvatura de la membrana para obtener la forma paraboloide.

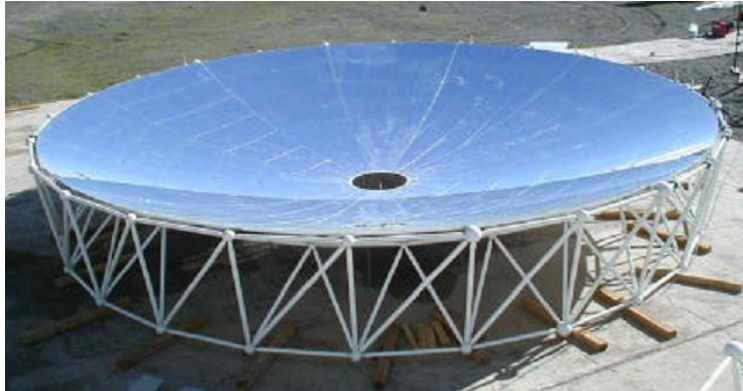
Figura 38. Funcionamiento de un concentrador solar. Tomado de: (32)



Para la operación del motor *Stirling* se desea que las temperaturas sean tan altas como sea posible, así se obtendrá un mayor rendimiento y trabajo neto del motor *Stirling*, lo que deriva en mayor producción de energía eléctrica, es decir, la salida de energía eléctrica del sistema es proporcional al tamaño del reflector y a su desempeño óptico, por consiguiente se usa un concentrador parabólico de gran tamaño.

Para obtener más altas temperaturas se necesita tener una relación de concentración solar alta. El diseño óptico del concentrador y su precisión determinan la relación de concentración. La relación de concentración, se define como el flujo solar promedio a través de la apertura del receptor dividida por la irradiación directa normal. Las fracciones de interceptación, son definidas como la fracción del flujo solar reflejado que pasa a través de la apertura del receptor, son usualmente sobre el 95% (30).

Figura 39. Concentrador parabólico usado en el sistema *EURODISH*. Tomado de: (31)



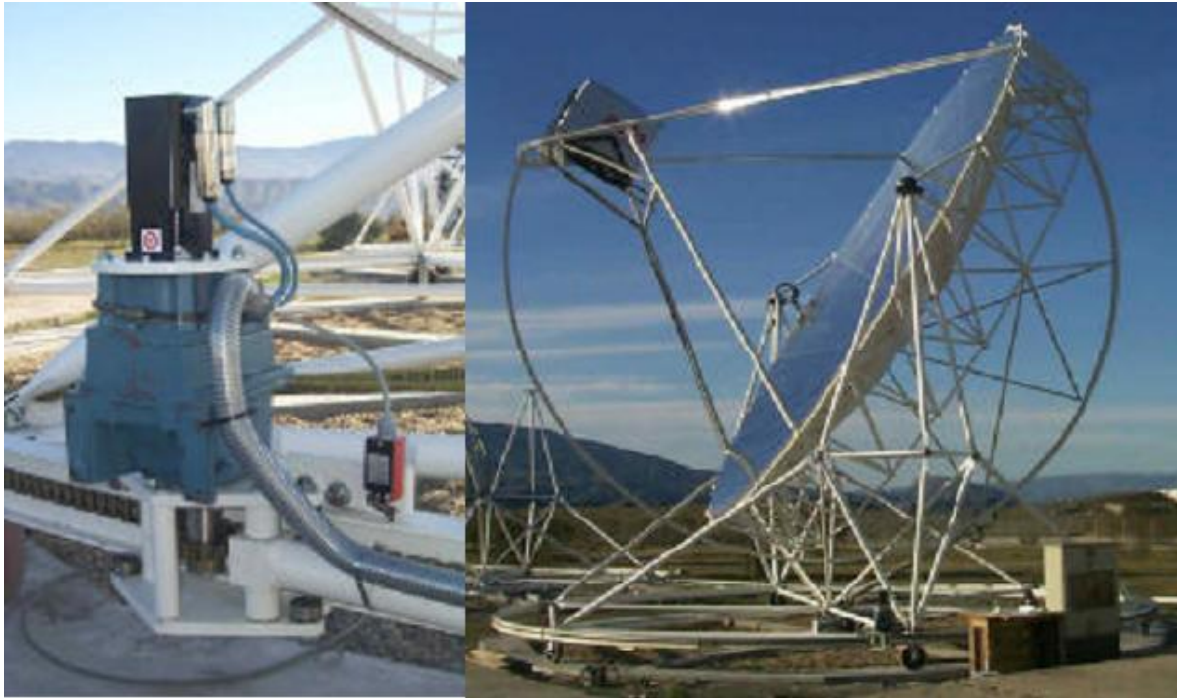
4.1.1.2 Sistema de seguimiento

Debido a que el concentrador necesita estar siempre perfectamente orientado hacia el Sol, este es montado sobre un sistema de rastreo o seguimiento Solar de dos ejes. El rastreo en dos ejes puede ser realizado en una de dos formas:

- Rastreo azimut elevación
- Rastreo polar

Generalmente son accionados por un servomotor. La orientación hacia el Sol puede realizarse mediante un sensor seguidor de Sol, o por medio de un programa especial que predice la posición del Sol.

Figura 40. Sistema seguidor de Sol del sistema *EuroDISH*. Tomado de: (31)



En la Figura 40, se muestra el sistema de seguimiento del sistema EuroDISH, en la parte izquierda se observa el servomotor que mueve el sistema para realizar la orientación horizontal.

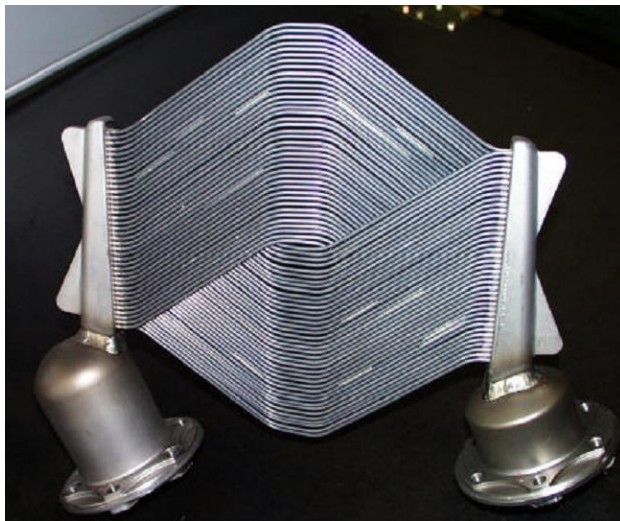
4.1.1.3 Receptor

El receptor o intercambiador de calor (del foco caliente del motor) es el enlace entre el colector y el motor *Stirling*. Cumple esencialmente dos tareas:

- La de absorber la mayor cantidad de radiación solar reflejada proveniente del concentrador en este, tanto como sea posible.
- La de pasar esta energía absorbida, al motor *Stirling* en forma de calor con la mínima cantidad de pérdidas posible.

En general hay dos tipos de receptores, un tipo es un receptor únicamente solar que opera solo mientras el Sol se encuentre en el cielo denominado DIR¹⁹, el otro tipo es un receptor híbrido el cual es equipado con un quemador gas y puede ser operado durante todo el día.

Figura 41. Receptor Solar para el motor *Stirling* SBP/SOLO V-160/161. Tomado de: (31)

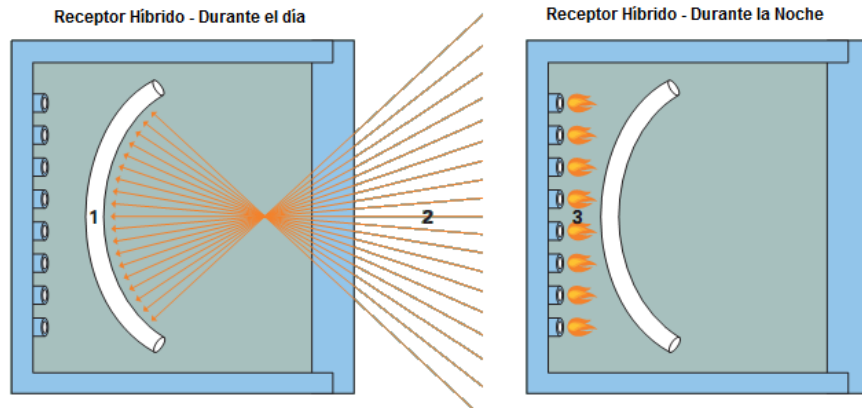


En la Figura 41 se observa un receptor concebido únicamente para absorber radiación solar, este modelo es el usado en los sistemas EuroDISH. En este en particular, se ha desarrollado un receptor tubular que está directamente conectado a la cabeza de los cilindros del motor *Stirling*. El receptor consta de varios tubos muy delgados, de aproximadamente 3 mm de diámetro, que resisten muy altas temperaturas. Estos tubos forman un área casi cerrada, que es la superficie del intercambiador. En este caso, la radiación solar concentrada calienta el gas de trabajo hasta 750°C aproximadamente(33).

En la Figura 42 se observa el funcionamiento de un receptor híbrido.

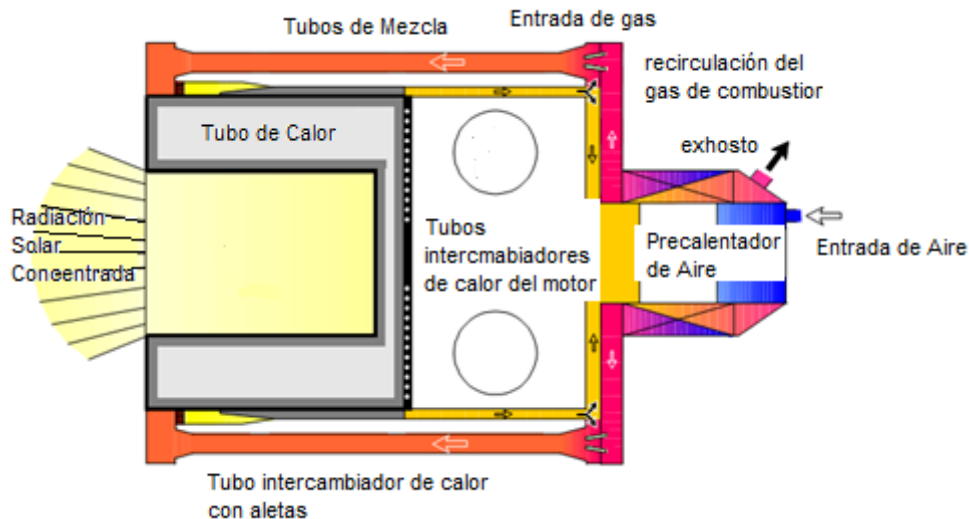
¹⁹ De las siglas en inglés: Direct Insolation Receiver

Figura 42. Funcionamiento de un receptor híbrido. Tomado de: (33)



En la Figura 43 se observa un receptor híbrido solar-gas, con *Heat Pipe* o de tubo caliente.

Figura 43. Receptor Híbrido de tubería caliente. Tomado de: (31)



El método de tubo de calor (*Heat Pipe*), vaporiza un metal líquido (generalmente sodio) que luego se condensa en la superficie de los tubos por los que circula el gas de trabajo y refluye nuevamente al absorbedor. Adicionalmente a la superficie de absorción solar, el receptor híbrido está equipado con un quemador a gas. Así el motor *Stirling* puede operar en momentos donde el Sol se encuentra oculto tras las nubes o en plena oscuridad. El sistema híbrido *Disco-Stirling* tiene la ventaja de poder estar en funcionamiento las 24

horas del día. Además, teniendo en cuenta que se trata de un sistema de energía renovable, se puede usar biogás como sustituto a otros tipos de gas combustible.

4.2 DESARROLLO Y ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DISCO-STIRLING

En los últimos 27 años, se han desarrollado varios modelos de sistema Disco-*Stirling* en los rangos de 25 a 50 kWe²⁰ en Estados Unidos, Alemania, Japón, Rusia, España, India, Arabia Saudita, Suecia y en algunos otros lugares del mundo. Se hará una revisión de los más importantes y se realizará una comparación entre ellos.

4.2.1 Sistema Distal de la Plataforma Solar de Almería

Los sistemas DISTAL son parte del programa de investigación en energías renovables de España. Estos sistemas se desarrollaron conjuntamente con la firma alemana (ubicada en Stuttgart) Schlaich Bergermann und Partner y con motores diseñados por United *Stirling* de Suecia y ahora fabricados por SOLO Kleinmotoren GmbH²¹ de Alemania (en Stindelfingen) (34).

4.2.1.1 Distal I

En operación desde 1992, esta instalación consistió inicialmente de 3 unidades de disco parabólico de 7,5 metros de diámetro capaces de recoger hasta 40 kWt²² de energía, con un motor *Stirling* SOLO V160 capaz de generar hasta 9 kWe situado en su zona focal. El prototipo de concentrador se construyó aplicando la tecnología de membrana tensionada, la cual mantiene la forma parabólica mediante una pequeña bomba de vacío. Su reflectividad es del 94% y es capaz de concentrar la luz solar hasta 12 000 veces en el centro de su foco de 12 cm de diámetro. Su distancia focal es de 4,5 metros y el sistema de seguimiento es polar (35).

²⁰ We se refiere a Watts de energía eléctrica.

²¹ La división de SOLO Kleinmotoren GmbH dedicada a la producción de motores Stirling se convirtió en la empresa CLEANENERGY AB y se encuentra en Suecia.

²² Wt se refiere a Watts de energía térmica

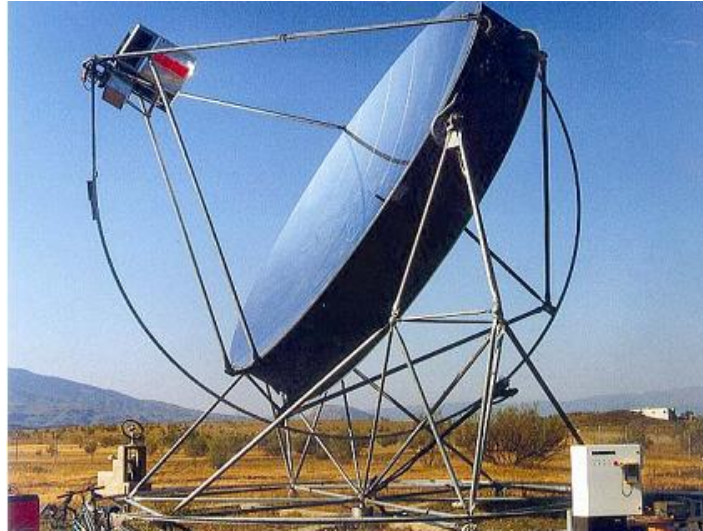
Figura 44. Un sistema DISTAL I en operación en la Plataforma Solar de Almería. Tomado de: (35)



4.2.1.2 *Distal II*

Como primer intento por obtener un sistema de mejores prestaciones y costo por kWe más reducido, se llevó a cabo el proyecto DISTAL II. Durante los años 1 996 y 1 997 fueron instalados y puestos en operación rutinaria tres discos basados en la tecnología de membrana tensionada. Estos prototipos tienen un diámetro ligeramente mayor, 8,5 m, con lo que la energía térmica aportada al motor es de 50 kWt. Su distancia focal es de 4,1 m y el valor máximo de concentración es de 16 000 soles en el centro de su foco. El motor *Stirling* también ha evolucionado, tratándose ahora del modelo SOLO V161, de 10 kWe. El sistema de seguimiento es ahora del tipo acimut-elevación, con lo que se consigue la operación automática en modo orto-ocaso (35).

Figura 45. Unidad DISTAL II ubicada en la Plataforma Solar de Almería. Tomado de: (35)



4.2.2 Sistema Vanguard de Advanco

Este sistema de 25 kWe, construido por Advanco en el sur de California en Rancho Mirage (1 982-1 985), es mostrado en la Figura 46.

Figura 46. El Sistema Vanguard de Advanco. Tomado de: (36)



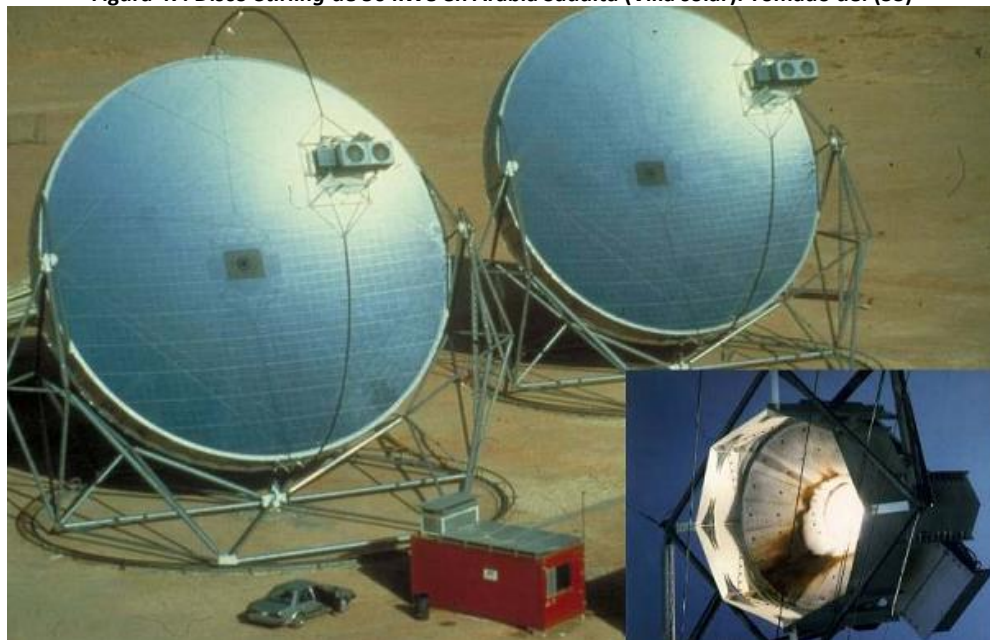
El sistema Disco *Stirling* Vanguard usa un disco de 10,5 m de diámetro con un DIR, y un motor *Stirling* 4-95 Mark II de United *Stirling*.

El sistema solo operó durante 18 meses debido a fallas presentadas en la parte mecánica del sistema, así como de fugas del gas de trabajo y excesivo ruido y vibraciones. Sin embargo el sistema consiguió el record mundial de eficiencia neta de conversión solar a eléctrica con un 29,4% durante casi 2000 horas de operación en los 18 meses de la fase de prueba (37).

4.2.3 Sistema SBP en Arabia Saudita

Dos unidades disco-*Stirling* de 50 kWe fueron construidos, instalados y operados en Riyadh, Arabia Saudita, en 1984 por Schlaich Bergermann und Partner (SBP). El concentrador tenía un diámetro de 17 metros, con la tecnología de membrana tensionada de acero inoxidable, con un espesor de 0,5mm. La superficie óptica de concentrador se realizó uniando trozos de vidrio a la membrana. Los receptores del sistema eran tipo DIR y el motor era 4-275 de *United Stirling* (38). En la Figura 47 se pueden observar las dos unidades disco-*Stirling* instaladas.

Figura 47. Disco-*Stirling* de 50 kWe en Arabia Saudita (Villa solar). Tomado de: (33)



4.2.4 Sistemas CPG

Durante el periodo comprendido entre 1 991 a 1 996 Cummins Power Generation (CPG) desarrollo dos sistemas *Disco-Stirling* como parte de un proyecto de costos compartidos con el departamento de energía de los Estados Unidos. En junio de 1 996 de Cummins Engine Company determinó enfocar sus esfuerzos de desarrollo únicamente en los motores diesel. Cerraron CPG y vendieron sus activos a Kombassan de Alanya, Turquía (34).

4.2.4.1 Sistema CPG de 7 kWe

Este sistema está comprendido por un concentrador compuesto por 24 espejos de 1,5 metros de diámetro, fabricados con un polímero reflectivo mediante el sistema de membrana tensionada. El concentrador es de tipo Heat Pipe. La base del sistema fue el motor de pistón libre de Clever Fellow's Innovative Consortium (CFIC). El motor CFIC tiene una configuración de pistones opuesta. El sistema demostró una potencia de 5,2 kWe y una eficiencia del 22%. En la Figura 48 se observa el sistema CPG de 7 kWe ubicado en Columbus, Indiana.

Figura 48. Sistema CPG de 7 kWe. Tomado de: (39)



4.2.4.2 Sistema CPG de 25 kWe

Este proyecto empezó en 1994 y uso un novedoso diseño de concentrador solar de alto rendimiento, construido por superficies de vidrio continuas creando así una hilera en forma circular tal como se observa en la Figura 49. El concentrador estaba diseñado para proporcionar aproximadamente 120 kW de potencia térmica al receptor. El motor *Stirling* seleccionado para este sistema fue el Aisen Seiki japonés de doble acción con 4 cilindros en línea con potencia nominal de 23 kWe, este operaba con helio como gas de trabajo y un control de presión para regular la salida de potencia.

Una de las potenciales ventajas de este motor era que estaba basado en un motor automotriz y por consiguiente muchas de sus partes eran producidas en serie. El sistema CPG de 25 kWe opero durante corto tiempo en la primavera de 1996 usando un receptor tipo *Heat pipe* y produjo una potencia neta de 22 kWe durante operación bajo el Sol.

Figura 49. Sistema CPG de 25 kWe. Tomado de: (40)



4.2.5 Sistema SAIC

Science Applications International Corporation (SAIC) junto con *Stirling Thermal Motors (STM)*, diseñó un sistema *Disco-Stirling* que utiliza un concentrador conformado por 16

espejos con tecnología de membrana tensionada, un receptor tipo *DIR* (originalmente de tipo *DIR*, los de segunda generación incluyeron un receptor híbrido) y un motor *Stirling* de *STM*, el 4-120.

El equipo SAIC/STM desarrollo el proyecto con miras a una etapa comercial, el cual se desarrolló en tres fases. La primera fase cubrió el diseño y prueba de los componentes de fabricación así como del primer prototipo; la segunda fase incluyó el desarrollo de un sistema de segunda generación que cubrió la operación del sistema, y la recolección de información sobre rendimiento y confiabilidad; en la tercera fase se tiene prevista la etapa pre-comercial con el desarrollo de un campo de aproximadamente 2 MW provista de 80 a 100 unidades *Disco-Stirling* en una locación en el estado de New Mexico, Estados Unidos, para efectos de prueba y evaluación del sistema a largo plazo. En la Figura 50 se muestra un sistema SAIC/STM de segunda generación (41).

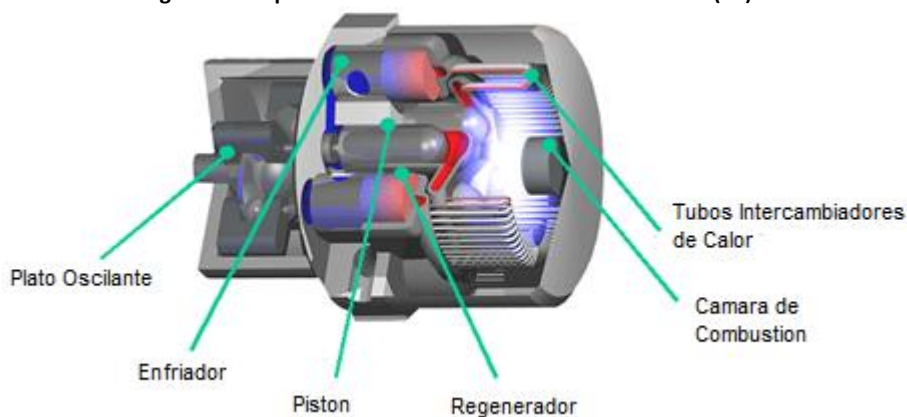
Figura 50. Sistema Disco-*Stirling* de SAIC/STM de segunda generación en Golden, Colorado. Tomado de: (40)



El motor *Stirling* es un motor de doble acción llamado *STM 4-120* de tercera generación. El *STM 4-120* es un motor de cuatro cilindros, de recorrido variable, el cual es logrado

mediante el uso de un plato oscilante de ángulo variable. Un esquema del motor se muestra en la Figura 51.

Figura 51. Esquema de un motor STM 4-120. Tomado de: (42)



En la Tabla 9 se muestra la ficha técnica de una unidad de segunda generación.

Tabla 9. Ficha Técnica para el sistema SAIC/STM. Tomado de: (41) y (43)

FICHA TÉCNICA UNIDAD SAIC/STM	
Altura del Sistema	15 m
Salida de Potencia Nominal	22 kWe para una irradiación de 1 000 W/m ²
Tensión de Salida	480 V, 3 Fases, 50/60 Hz
Disponibilidad	24 Horas/Día, Operación Híbrida
Eficiencia Solar-Eléctrica	
Anual	18%
Pico	24,3%
Producción Anual de la unidad instalada en UNLV en Las Vegas, Nevada	43 900 kW-h (Solo DIR)
Concentrador	
Tipo	Discos reflectores de membrana tensionada
Área	114 m ²
Diámetro	14 m
Número de espejos reflectores	16
Diámetro de cada espejo	3 m

Superficie reflectora	1.0 mm. Vidrio con bajo contenido de hierro
Reflectividad	> 90%
Foco	Variable, Activo
Posición de Reposo	Frente Abajo
Motor Stirling	
Tipo	III Generación STM 4-120 de Doble Acción
Potencia/Velocidad	30 kW/1 800 rpm
Temperatura del Gas de Trabajo	720 °C
Eficiencia Térmica Máxima	42%
Control de Potencia	Plato oscilante de ángulo variable
Número de Cilindros	4
Volumen Barrido	120 cm ³ /cilindro = 480 cm ³
Receptor	DIR + Quemador Híbrido (UNLV solo DIR)

En la Tabla 9 se cita también los datos de una unidad instalada en la Universidad de Nevada Las Vegas (UNLV), que tiene un receptor tipo DIR y muestra el dato para la producción anual de energía eléctrica para esta unidad. (43)

En la Tabla 10 se muestra la eficiencia energética estimada para cada uno de los procesos involucrados en la conversión energía solar-energía eléctrica. (44)

Tabla 10. Eficiencia de los procesos en una unidad SAIC/STM de segunda generación. Tomado de: (44)

EFICIENCIA EN LOS PROCESOS DEL SISTEMA DISCO-STIRLING SAIC/STM²³			
Descripción de la Etapa	Eficiencia de la Etapa (%)	Eficiencia Acumulada (%)	Potencia (kW)
Irradiación Solar	100	100	113,5
Reflejada por los espejos	93,1	93,1	105,7
Interceptada en la apertura	90,3	84,1	95,4
Absorbida por el receptor	85,0	71,5	81,1
Transferencia de calor en el	98,0	70,0	79,5

²³ La irradiación se asume directa normal con un valor de 1 000 W/m²

receptor			
Eficiencia Mecánica del Motor	36,1	25,3	28,7
Eficiencia de la Transmisión	98,0	24,8	28,1
Salida en bruto del Generador	92,0	22,8	25,9
Pérdidas Eléctricas Parásitas	-2,2 kW	20,9	23,7

4.2.6 Sistema EURODISH™

Es el segundo y, por ahora, último intento para acercar esta tecnología al umbral de la rentabilidad económica en Europa. Existen unidades ubicadas en la Plataforma Solar de Almería (35) y algunas otras repartidas por Europa, como en Italia, Francia, Alemania e incluso en Arabia Saudita y en la India (33) (45).

Se han diseñado y construido los nuevos prototipos, en los cuales se ha pretendido actuar sobre los siguientes aspectos:

- Reducción del precio de los componentes mediante la identificación de elementos de uso estándar en la industria.
- Desarrollo de un nuevo sistema de fabricación para el disco concentrador. Se ha abandonado la tecnología de membrana tensionada y se ha utilizado un sistema de moldes y material 'composite'.
- Mejora del motor 'Stirling' SOLO V161, especialmente de aquellos componentes utilizados en la cavidad que recibe la energía solar concentrada.
- Desarrollo de un nuevo procedimiento optimizado para el montaje del sistema, usando nuevas herramientas especiales.
- Control y monitorización remotos a través del World Wide Web (www).
- Ensayo de unidades precomerciales como sistemas de referencia.

Figura 52. Sistema EuroDISH™ en la plataforma solar de Almería vista desde adelante y desde atrás. Tomado de: (35)



En la Figura 52 se observa una unidad EuroDISH™ instalada en la Plataforma Solar de Almería, a continuación se muestra la ficha técnica de la unidad.

Tabla 11. Ficha Técnica para un sistema EuroDISH™. Tomado de: (31)

Ficha Técnica EURODISH™		
Concentrador		
Diámetro	8,5 m	
Área Proyectada	56,7 m ²	
Distancia Focal	4,5 m	
Factor de Concentración Promedio	2500	
Reflectividad	94%	
Sistemas de Seguimiento y Control		Socios
Suspensión	Elevación sobre Azimut	Sclaich Bergemann und Partner; Alemania
Posición de Reposo	Frente del concentrador abajo	SOLO Kleinmotoren GmbH; Alemania
Velocidad máxima del viento permitida durante operación	65 km/h	Klein + Stekl GmbH; Alemania
Velocidad máxima del viento en	160 km/h	MERO-Raumstruktur

posición de reposo		GmbH&Co; Alemania
Actuador/Impulsor	Servomotor	DLR eV; Alemania
Velocidad del Actuador	60 °/min	Inabensa SA; España
Sistema de Control	PC, micro-controlador	CIEMAT; España
Transferencia de Datos	InterBUS-S	
Control Remoto	Teléfono/Internet	
Motor Stirling y Generador		
Tipo	Acción simple, motor en V de 90° (Tipo α)	
Volumen Barrido	160 cm ³	
Potencia Bruta	9,8 kW	
Potencia Neta	9,2 kW	
Conexión a la Red	400 V, 50 Hz, 3 fases	
Temperatura del gas en el receptor	650 °C	
Gas de Trabajo	Helio	
Presión del Gas	20 – 150 bar	
Control de la Potencia del Motor	Control de Presión	

Schlaich Bergermann und Partner junto a SOLO desarrollaron el motor *Stirling* V160 y V161, este último mostrado en la Figura 53. El modelo de la figura solo tiene el receptor solar.

Figura 53. Motor *Stirling* SOLO V161 con receptor solar únicamente. Tomado de: (31)



4.2.7 Sistema SUNCATCHER™

Este proyecto se convirtió en el primer sistema Disco-*Stirling* en pasar a la etapa de comercialización después de 25 años de desarrollo, y sustenta el record en eficiencia de conversión de energía solar a energía eléctrica, evento logrado en el mes de enero de 2008 cuando alcanzó una eficiencia promedio en una hora de 31,25% (46).

En 1984, la *McDonnell Douglas Corporation* (MDAC, ahora parte de *Boeing Company*) junto a *United Stirling AB*, una división de *Kockums* ubicada en Malmo, Suecia, desarrollaron un sistema Disco-*Stirling* para generación de energía eléctrica. En 1996, *Stirling Energy Systems* (SES) ubicada en Phoenix, Arizona, adquirió todas las patentes de ingeniería y diseño del concentrador de la MDAC y la licencia para fabricar el motor *Stirling Kockums 4-95*, y lo llamó el *SunCatcher™*. (47), (48)

Poco tiempo después, SES realizó dos sociedades colaborativas con el sector público: *Sandia National Laboratory*, ubicados en Albuquerque, New Mexico; y con el departamento de energía de los Estados Unidos (DOE) (48).

En la Figura 54 se observa una fotografía de una unidad *SunCatcher™* instalada en el desierto de Mojave en California. Este modelo es el que fue usado casi desde el comienzo del proyecto, con base en el cual se realizaron todos los estudios, mediciones y mejoras.

Figura 54. Unidad Disco-Stirling de *Stirling Energy Systems* (SES), y sus principales componentes. Tomado de: (48)



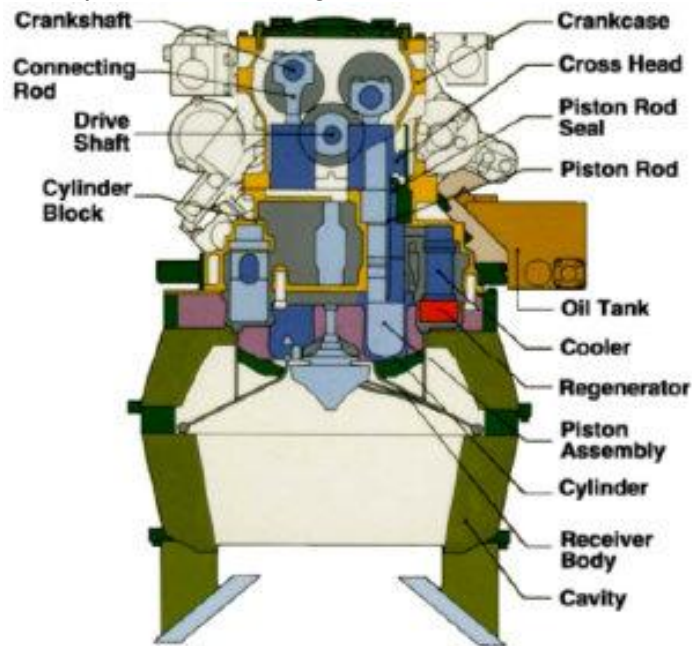
En la Figura 55 se observa la Unidad de Conversión de Potencia (PCU) usada en el sistema SunCatcher™. En la parte izquierda se muestra en primer plano el extremo del receptor de la PCU, el espiral de metal corresponde al intercambiador del foco caliente del motor; en la parte derecha se observa el ventilador extractor de calor en la parte trasera de la unidad, el ventilador de enfriamiento ayuda a mantener refrigerado tanto el foco frío del motor, así como el alternador.

Figura 55. PCU usado en el SunCatcher con el Motor *Stirling* Kockums 4-95. Tomado de: (49)



En la Figura 56 se observa el esquema del motor usado en la unidad SunCatcher™, el modelo Kockums 4-95 también conocido como *Mark II*, el cual es un motor de doble acción, que controla la potencia por medio de la presión del gas.

Figura 56. Esquema del Motor *Stirling* Kockums 4-95 o *Mark II*. Tomado de: (50)



En la Tabla 12 se muestra la ficha técnica del sistema SunCatcher™ de *Stirling* Energy Systems correspondiente al modelo mostrado en la Figura 54.

Tabla 12. Ficha Técnica para una unidad SunCatcher de SES. Tomado de: (47), (43),(51) y(52)

FICHA TÉCNICA UNIDAD SES SUNCATCHER™	
Altura del Módulo	11,89 m
Ancho del Módulo	11,28 m
Peso del Módulo	6 934 kg
Concentrador	
Área	87,67 m ²
Distancia Focal	7,45 m
Concentración en:	
Punto Focal	7 500 soles
Receptor	780 soles
Número de Espejos	82 (máximo 88)
Tipo de Vidrio	Comercial
Tipo de Espejo	Plata en el fondo
Espesor de la superficie reflectora	0,7 mm
Reflectividad	> 91%
Motor Stirling Kockums 4-95	
Peso del motor en seco	225 kg
Dimensiones del Motor	66 cm * 71 cm * 58 cm
Receptor	Tipo DIR
Número de Pistones	4, de doble acción
Volumen Barrido	380 cm ³ (4*95 cm ³)
Fluido de Trabajo	Hidrógeno
Presión del Fluido de Trabajo	20 MPa
Temperatura del Fluido de Trabajo	720 °C
Control de Potencia	Presión del Fluido
Refrigeración	Agua/Forzada mediante ventilador
Salida de Potencia Máxima	27 kW
Potencia Nominal	22 kW

Eficiencia Nominal	38-42%
Características de la PCU	
Peso	< 680 kg
Dimensiones	168 cm * 122 cm * 183 cm
Irradiación Mínima de Funcionamiento	200 W/m ²
Alternador	Inducción a 1 800 rpm
Eficiencia del Alternador	94,8 %
Tensión de Salida	480 V, 3 fases, 60 Hz
Salida de Potencia Bruta	25 kW con una irradiación de 1 000 W/m ²
Potencia Pico	24,9 kW
Eficiencia Pico Neta	28-31,25%
Eficiencia Anual	24%
Producción Anual	54 500 kWh para irradiación de 7,1 kWh/m ² /día

En la Tabla 13 se observa la eficiencia en los procesos del sistema (en términos de potencia) para una irradiación solar de 1 000 W/m², mientras que en la Tabla 14 se presenta el rendimiento energético en cada uno de los procesos para un nivel de energía diario de 10 kWh/m² (que es un valor muy alto). Es preciso mencionar que estos son valores de referencia sobre mediciones realizadas en sitios de prueba y condiciones de referencia como niveles de irradiación, velocidad del viento, temperatura externa, estado de limpieza de los espejos reflectores y otras condiciones que pueden afectar el rendimiento de la unidad.

Tabla 13. Eficiencia de los procesos en una unidad SunCatcher de SES. Tomado de: (52)

EFICIENCIA EN LOS PROCESOS DEL SISTEMA DISCO-STIRLING SUNCATCHER™ DE SES			
Descripción de la Etapa	Eficiencia de la Etapa (%)	Eficiencia Acumulada (%)	Potencia (kW)
Irradiación Solar (1 000 W/m ²)	100	100	87,670

Reflectividad	91,10	91,10	79,867
Interceptada			
Seguimiento			
Ondulación de la superficie	96,70	88,09	77,232
Error de inclinación en los espejos			
Receptor			
Conducción	90,0	79,28	69,509
Reflectividad			
Transferencia de calor en el receptor	99,0	78,51	69,161
Eficiencia del Motor	42,40	33,12	29,047
Eficiencia del Generador	94,8	31,40	27,537
Pérdidas Parásitas	95,55	30	26,301

Tabla 14. Desempeño Energético de la unidad SunCatcher de SES. Tomado de: (52)

EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS PROCESOS DEL SISTEMA DISCO-STIRLING SUNCATCHER™ DE SES			
Descripción de la Etapa	Eficiencia de la Etapa (%)	Eficiencia Acumulada (%)	Energía (kWh)
Energía Diaria (10 kWh/m ²)	100	100	876,9
Pérdidas en Reflectividad	91,0	91,0	797,98
Pérdidas en Interceptación			
Seguimiento			
Ondulación de la superficie	86,70	88,0	771,65
Error de inclinación en los espejos			
Receptor			
Conducción	90,0	79,20	694,49
Reflectividad			
Transferencia de calor en el receptor	99,5	78,80	691,02
Eficiencia del Motor	38,78	30,58	268,00
Eficiencia del Generador	93,0	28,42	249,24
Pérdidas Parásitas	94,8	26,97	236,48

Recientemente, *Stirling Energy Systems* (SES) reveló su nuevo modelo de SunCatcher™. El sistema optimizó con miras a la producción en masa, reducción en costos de operación y mantenimiento, mayor disponibilidad y confiabilidad y facilidad en el mantenimiento. Este nuevo modelo tiene como ventajas frente a su antecesor una reducción importante en los

costos, ya que muchas de sus partes se fabrican ahora según la cadena productiva de fabricación automotriz, tal es el caso de los espejos; en el motor se logró una reducción de 60 en el número total de partes; una reducción en peso de aproximadamente 5 000 lb y una mejora en la durabilidad. En cuanto a la parte ambiental se tienen también ciertas ventajas como que esta tecnología usa la menor cantidad de agua comparada con cualquier otra tecnología solar térmica, no requiere una cimentación profunda y no emite gases de efecto invernadero debido a que su recetor es tipo DIR (53).

Existen proyectos en curso como una planta de referencia con base en Arizona con una capacidad de 150 MW, proyectos firmados con Southern California Edison en el desierto de Mojave para una capacidad de 850 MW (proyecto en expansión), con San Diego Gas & Electric en el Imperial Valley con 750 MW y más recientemente en CPS Energy en el oeste de Texas. Se espera que la producción en masa y el despegue del SunCatcher™ se inicie en el año 2 010, y se espera tener instalados por lo menos 1000 MW a finales del 2 012 (48), (53).

Figura 57. Sistema Optimizado del SunCatcher de SES. Tomado de: (48)



4.3 TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR (CSP)²⁴

Las tecnologías CSP producen calor o electricidad usando espejos para concentrar los rayos solares hasta temperaturas típicas entre 400 y 1 000 °C. Existe una gran variedad en la forma de los espejos, métodos de seguimiento solar y formas de producir energía, sin embargo todos ellos trabajan bajo el mismo principio: Concentración. Las tecnologías CSP usan los rayos directos del Sol o Radiación Directa²⁵, que son los rayos solares que no han sido desviados por nubes, vapores o polvo en la atmósfera y alcanza la superficie terrestre en forma casi paralela para su concentración. Las locaciones más viables son aquellos que reciben bastante de esta radiación solar directa como en las estepas, llanuras y desiertos, por lo menos 2 000 kWh/m² de radiación solar al año (54)

Existen cuatro principales tecnologías CSP en el mundo:

- Sistema de Receptor Central o Torre Solar
- Sistemas Cilindro-Parabólicos o SEGS
- Reflectores Lineales de Fresnel
- Sistema Disco-*Stirling*

4.3.1 Sistemas de Receptor Central o Torre Solar

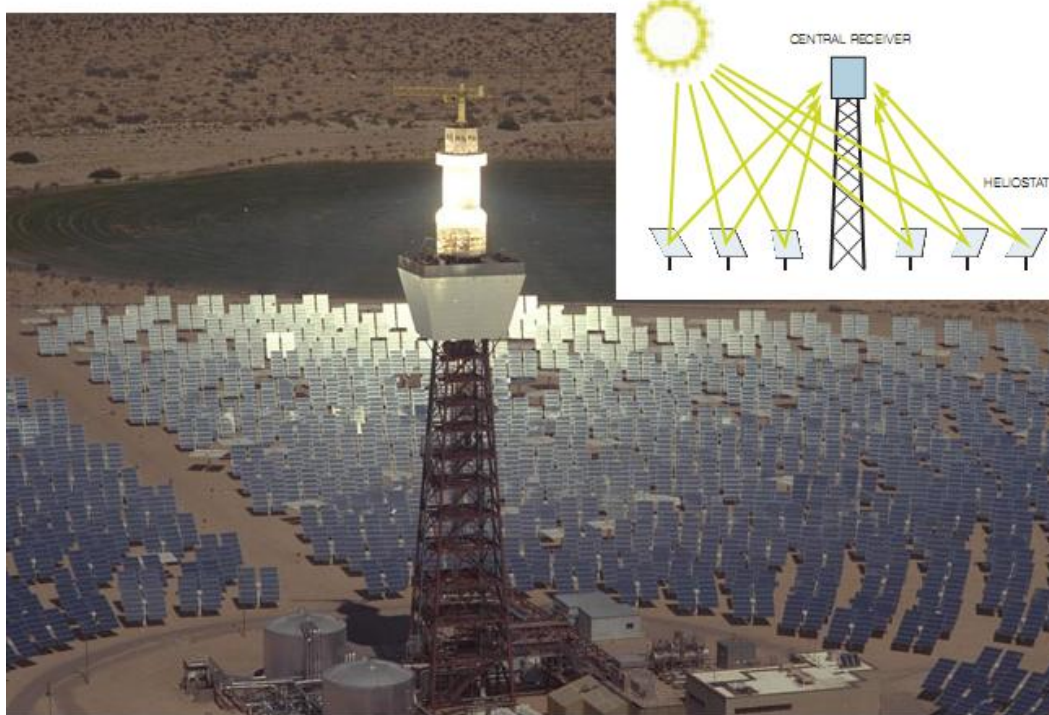
Este sistema consiste de un arreglo circular de heliostatos (grandes espejos con movimiento seguidor de Sol) que concentran la radiación solar en un receptor central montado en la parte superior de una torre concentrando la luz solar de 600 a 1 000 veces y alcanzando temperaturas de 800 °C hasta por encima de los 1 000 °C. Un medio transmisor de calor en este receptor central absorbe la alta radiación solar concentrada (reflejada por los heliostatos) y la convierte en energía térmica, la cual es usada para generar vapor a muy altas temperaturas para su utilización en una turbina.

²⁴ CSP de las siglas en inglés: *Concentrating Solar Power*

²⁵ La radiación directa así como los otros tipos de radiación se explica con más detalle en el capítulo 1: RADIACIÓN SOLAR

En la Figura 58 se observa el esquema general del funcionamiento de una planta de receptor central junto a una fotografía del proyecto Solar One en el desierto de Mojave, California.

Figura 58. Esquema de un sistema de receptor central y sistema *Solar One*. Tomado de: (54) y (55)

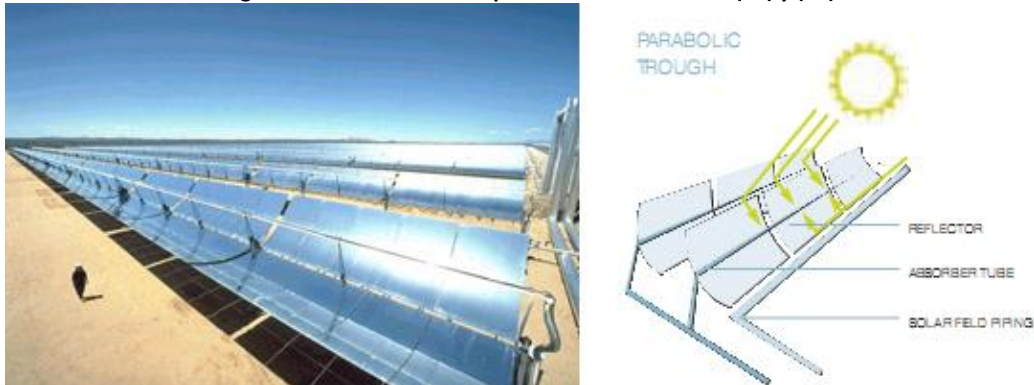


Los sistemas cilindro-parabólicos son la tecnología más madura entre las CSP y han probado ser comercialmente viables. Los espejos cilíndricos-parabólicos se usan para concentrar la radiación solar en un tubo receptor térmico ubicado en la línea focal del cilindro parabólico aproximadamente de 70 a 100 veces alcanzando temperaturas de 350 a 550 °C. Los cilindros usualmente son diseñados para seguir al sol en un solo eje. Un fluido de transmisión térmico es usado en el interior del receptor, tal es el caso de aceites sintéticos, agua o sales fundidas, el cual es circulado dentro de este tubo y luego es bombeado a través de una serie de intercambiadores de calor para producir vapor muy caliente, este vapor es convertido en energía eléctrica a través de un generador convencional impulsado por una turbina de vapor. El sistema puede ser parte de un sistema

de generación convencional a ciclo de vapor o de un sistema integrado de generación con turbina a vapor y gas.

En la Figura 59 se observa un esquema de un sistema cilindro-parabólico y una fotografía del sistema instalado en la infraestructura del proyecto Nevada Solar One.

Figura 59. Sistema cilindro-parabólico. Tomado de: (54) y (35)



4.3.2 Reflectores Lineales de Fresnel

Este sistema consiste en un arreglo de reflectores casi planos que concentran la radiación solar hacia receptores lineales invertidos que se encuentran elevados. Este sistema de concentración lineal es similar al sistema cilindro-parabólico, con las ventajas de tener más bajo costo para la estructura y los reflectores, uniones para el fluido fijas, un receptor separado del sistema y largas distancias focales, lo que permite el uso de grandes espejos casi planos. Esta tecnología es vista como la potencial reemplazante de la cilindro-parabólica debido al menor costo en la producción.

En la Figura 60 se presenta un esquema del funcionamiento del sistema de reflectores lineales de Fresnel y en la Figura 61 se presenta el sistema lineal de Fresnel en la Plataforma Solar de Almería en España.

Figura 60. Esquema del sistema de reflectores lineales de Fresnel. Tomado de: (54)

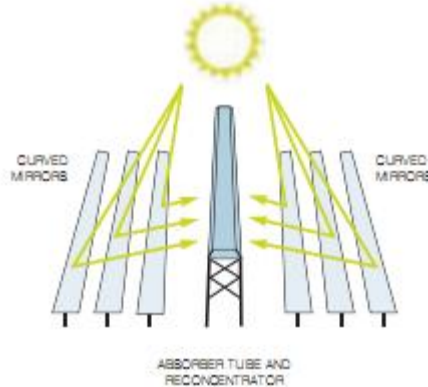


Figura 61. Sistema lineal de Fresnel en la Plataforma Solar de Almería. Tomado de: (35)



4.4 COMPARACIÓN DEL SISTEMA DISCO-STIRLING CON OTRAS TECNOLOGÍAS SOLARES DE CONCENTRACIÓN (CSP)

Las tecnologías de concentración solar (CSP) pueden ser comparadas desde varias perspectivas. Aunque comparten el mismo principio fundamental de usar espejos para reflejar y concentrar la luz solar en un receptor creando temperaturas altas para alimentar un motor térmico (motor *Stirling*, turbina de vapor etc.) con una razonable alta eficiencia.

En cuanto a la eficiencia, todas las tecnologías usan máquinas térmicas, lo que implica que cuánto más alta sea la temperatura de la fuente caliente, más alta será la eficiencia. La

clave para obtener más altas temperaturas es obtener la mayor cantidad de energía concentrada posible, esta concentración (para la radiación solar) se puede medir en “soles”, en el cual la referencia de 1 sol significa que no hay concentración. Los sistemas Disco-*Stirling* alcanzan una concentración de hasta 3 000 soles, los receptores centrales de hasta 1 000 soles y los reflectores lineales de Fresnel y los sistemas cilindro-parabólicos de aproximadamente 100 soles. De esto se puede deducir que la eficiencia alcanzada por el sistema Disco-*Stirling* sea la más alta mientras que las tecnologías lineales tengan la más baja.

Existen algunos otros parámetros para medir la eficiencia, los que incluyen la eficiencia pico tanto bajo condiciones de diseño (proyectada) como la medida en los campos de prueba (demostrada); los requerimientos de tierra por unidad de energía producida; la cantidad de energía producida al año y la eficiencia anual de conversión solar-eléctrica. En cuanto a la eficiencia anual de conversión solar-eléctrica²⁶, el sistema Disco-*Stirling* ha alcanzado eficiencias entre un 21% y un 26% (para casos excepcionales de 10 kWh/m² al día), los receptores centrales hasta un 20% (56), los cilindro-parabólicos hasta un 16,1% (57) y los reflectores de Fresnel hasta un 11% (58). En términos de los requerimientos de tierra en acres²⁷, los sistemas Disco-*Stirling* requieren aproximadamente 4 acres/MW, los sistemas cilindro-parabólicos y los reflectores de Fresnel unos 5 acres/MW y las torres solares aproximadamente 8 acres/ MW (44). Se observa de este modo que en estos aspectos el sistema Disco-*Stirling* tiene nuevamente la ventaja sobre las otras tecnologías de concentración.

Otro aspecto en la comparación de estas tecnologías es la disponibilidad. En cuanto a disponibilidad se refiere, se analiza la posibilidad de almacenamiento e hibridación de los sistemas. Aunque todos los sistemas poseen la posibilidad de trabajo híbrido y se mantienen en el mismo nivel en esta área, en el almacenamiento térmico está en

²⁶ Para conversión únicamente usando energía Solar

²⁷ 1 Acre equivale a 4 046,85642 m²

desventaja el sistema *Disco-Stirling* respecto a las otras tecnologías cuando es el almacenamiento térmico el respaldo en vez de la combustión de un gas o un líquido.

Ambientalmente, debido a que las tecnologías CSP necesitan concentrar los rayos del Sol, las ubicaciones de estas tecnologías deben estar ubicadas en terrenos con cielos abiertos y altos niveles de radiación. Si tal ubicación pertenece a una zona desértica, minimizar la cantidad de uso de agua es una cuestión importante. En este caso, el sistema *Disco-Stirling*, que generalmente no usa agua para su refrigeración pero sí para su limpieza, tiene la ventaja respecto a las otras tecnologías debido a que estas usan grandes cantidades de agua en los ciclos de refrigeración, como se aprecia en la Figura 62, donde se muestra la cantidad de agua requerida para una planta de 500 MW en acre-pie por año²⁸. Adicionalmente los sistemas *Disco-Stirling* son muy silenciosos y tienen una relativa baja altura.

Figura 62. Cantidad de agua requerida en las tecnologías CSP. Adaptado de: (48)



En la Tabla 15 se presentan algunas de las características de comparación entre las tecnologías de concentración solar (CSP).

²⁸ 1 acre-pie equivale a 1 233,4818 m³

Tabla 15. Comparación entre las tecnologías de concentración solar (CSP). Tomado de: (58) y (59).

	Cilindro-Parabólico	Reflectores Lineales Fresnel	Receptor Central	Disco-Stirling
Capacidad [MW]	10-200	10-200	10-150	0,01-0,4
Concentración	70-80	25-100	600-1 000	1 000-3 000
Temperatura de Operación [°C]	350-550		800-1 000	650-750
Eficiencia del Ciclo Térmico	30-40% Vapor	30-40% Vapor	30-40% Vapor 45-55% C. Comb.	30-40 % <i>Stirling</i>
Eficiencia Solar Pico	21%	20%	20% Vapor 35% C. Comb.	31,25%
Eficiencia Solar Anual	10-15%	9-11%	8-16% Vapor 15-25% C. Comb.	21-26%
Factor de Capacidad Anual Solar	24%	25-70%	25-70%	25%
Requerimiento aprox. de Tierra [acre/MW]	5	5	8	4
Requerimiento aprox. de agua [m³/MW]	7 894,28	°---°	308,37	54,27

En la Tabla 16 se presenta una comparación entre las principales tecnologías de concentración solar (CSP) presentada en el reporte: “*Concentrating Solar Power: Outlook 2 009*”, realizado por Greenpeace International, *SolarPACES* (organización de cooperación internacional relacionado a las tecnologías de concentración solar, cuenta con el aval de la Agencia Internacional de Energía), y *ESTELA* (*European Solar Thermal Electricity Association*).

Tabla 16. Comparación de las aplicaciones, ventajas y desventajas de las principales tecnologías CSP. Tomado de: (54)

	Cilindro-Parabólico	Receptor Central	Disco-Stirling	Reflectores Lineales de Fresnel
Aplicaciones	Plantas conectadas a la red eléctrica, procesos de media a alta temperatura (Capacidad más alta de una unidad sencilla a la fecha: 80 MWe. Capacidad total construída: Mas de 500 MW y más de 10 GW bajo construcción o propuestos)	Plantas conectadas a la red eléctrica, procesos de alta temperatura (Capacidad más alta de una unidad sencilla a la fecha: 20 MWe en construcción, capacidad total de ~50 MW con al menos 100 MW en desarrollo)	Unidades Independientes, Proyectos medianos no conectadas a la red eléctrica (consumos locales), Agrupadas en grandes parques para conexión a la red eléctrica. Unidad sencilla de mayor capacidad a la fecha: 100 kWe. Proyectos propuestos para 1 600 MW en E.U. y 100 MW en Australia	Plantas conectadas a la red eléctrica, generación de vapor para uso en plantas térmicas convencionales Capacidad más alta de una unidad sencilla a la fecha: 5 MW en E.U. con 177 MW en instalación y bajo desarrollo
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible Comercialmente – Más de 16 millones de MWh de experiencia operacional; potencial temperatura de operación hasta 500°C (400°C probados en unidades comerciales) • Eficiencia neta anual demostrada en plantas comerciales de 14% (solar-eléctrica) • Costos de inversión y operación comercialmente demostrados • Modularidad • Buen factor de uso de tierra • Baja demanda de materiales • Concepto Híbrido probado • Capacidad de almacenamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Buenos prospectos a mediano plazo para altas eficiencias de conversión, potenciales temperaturas de operación de hasta 1000°C (565°C probados en una escala de 10 MW) • Almacenamiento a altas temperaturas • Posibilidad de operación Híbrida • Mejores posibilidades para enfriamiento en seco que en cilindro-parabólico y Fresnel • Mejores opciones de locación en sitios no llanos 	<ul style="list-style-type: none"> • Muy alta eficiencia de conversión solar-eléctrica • Modularidad • Experiencia operacional en los proyectos de demostración • Fácil manufactura y producción en masa de partes • No requiere agua para refrigeración • Almacenamiento térmico más eficiente en plantas grandes • Disponibilidad Comercial en 2010 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta disponibilidad • Espejos planos pueden ser comprados y curvados en la locación, bajos costos de manufactura • Posibilidad de operación híbrida • Alta eficiencia espacial alrededor del medio día solar
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • El uso de medio transmisor de calor de origen oleaginoso 	<ul style="list-style-type: none"> • Valores proyectados anuales de 	<ul style="list-style-type: none"> • No hay aún plantas en gran escala de tipo comercial 	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada reciente al mercado, solo hay pequeños

	restringe la temperatura de operación hasta 400°C, resultando en calidades moderadas del vapor	rendimiento y costos de operación necesitan una prueba a mayor escala en la operación de plantas comerciales	<ul style="list-style-type: none"> • Aún sin demostrar las metas de costos proyectadas para la producción en masa • Baja despachabilidad • Receptores Híbridos aún en I+D 	proyectos en operación
--	--	--	--	------------------------

5 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL SISTEMA DISCO-STIRLING EN COLOMBIA

5.1 RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA Y LOCALIZACIÓN DE UN PROYECTO DE GENERACIÓN

En el 2 002 se suscribió un convenio entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME para estudiar las áreas de potencial energético, específicamente de energía solar, eólica e hidráulica. El fin de este estudio era el de identificar aquellas áreas que pudieran ser aptas para la implementación de tecnologías energéticas, en este caso solares, y dar así cumplimiento a la ley 697 de 2 001, que fomenta el uso racional y eficiente de la energía y promueve la utilización de energías alternativas, y en desarrollo del Decreto 3683 de 2 003, referente al inventario de fuentes de energía convencionales y no convencionales. En el año 2005 se publicó el resultado de estos estudios en el “ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA”, que tenía como antecedente otro título publicado por el HIMAT (precursor del IDEAM) en el año de 1 993. Sin embargo, en esta última edición se presentan mejoras en cuanto a la cantidad de estaciones y datos recogidos, así como en las hipótesis y los métodos de cálculo.

El resultado de este trabajo es un conjunto de mapas que representan la radiación solar global y el brillo solar sobre el territorio nacional, hay uno para el promedio de cada mes y uno con el promedio multianual (promedio de la medición durante varios años). Estos sirven como referencia para la identificación de regiones estratégicas donde es más adecuada la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas de la población. A continuación se presenta el mapa multianual para la radiación solar global en kWh/día, también se presenta el mapa para el brillo solar en horas, para así analizar y situar la ubicación apropiada para implementar un proyecto de generación piloto con base en el sistema Disco-*Stirling*.

Figura 63. Mapa del promedio multianual de radiación solar global de Colombia en kWh/m². Tomado de: (13)

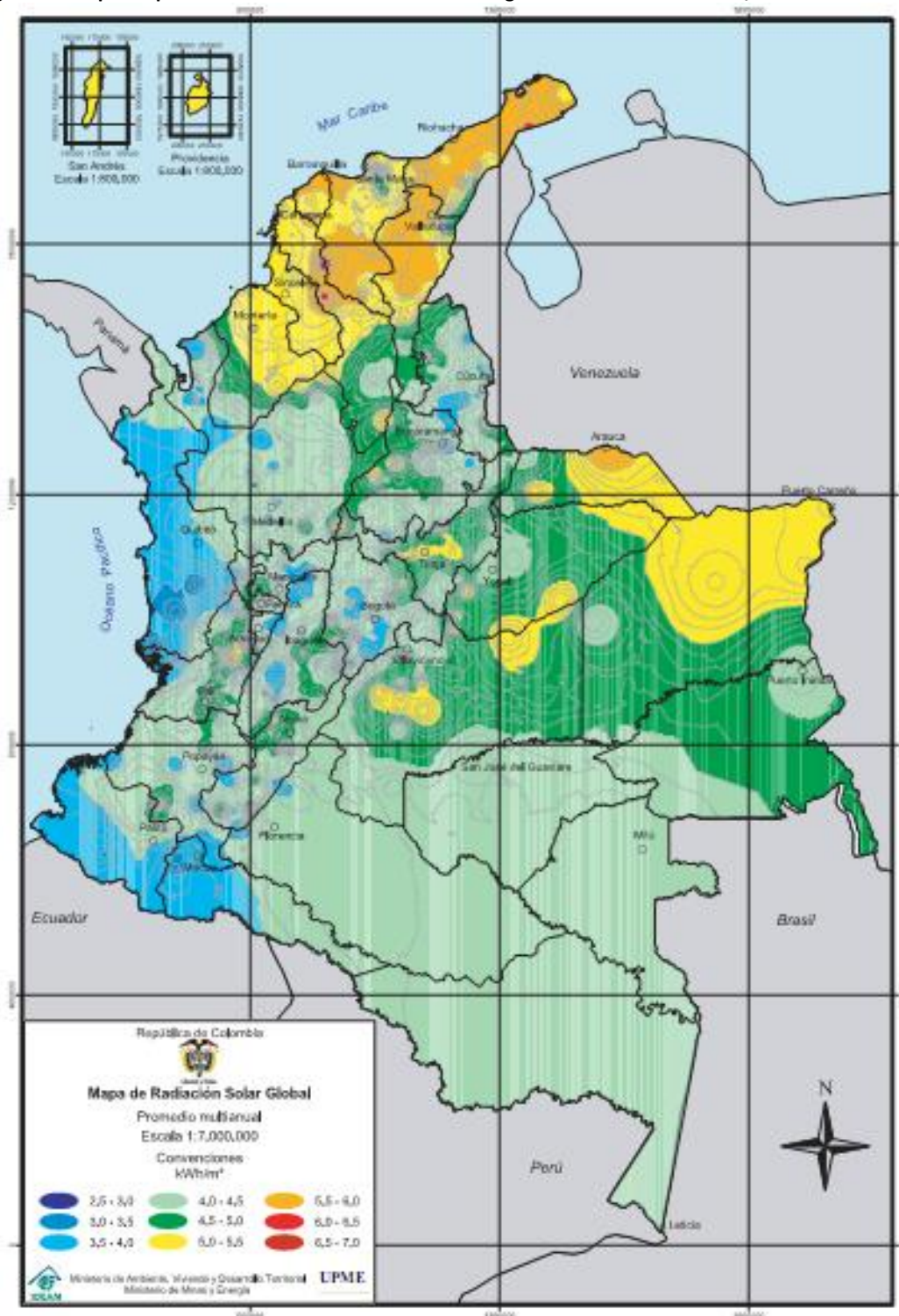
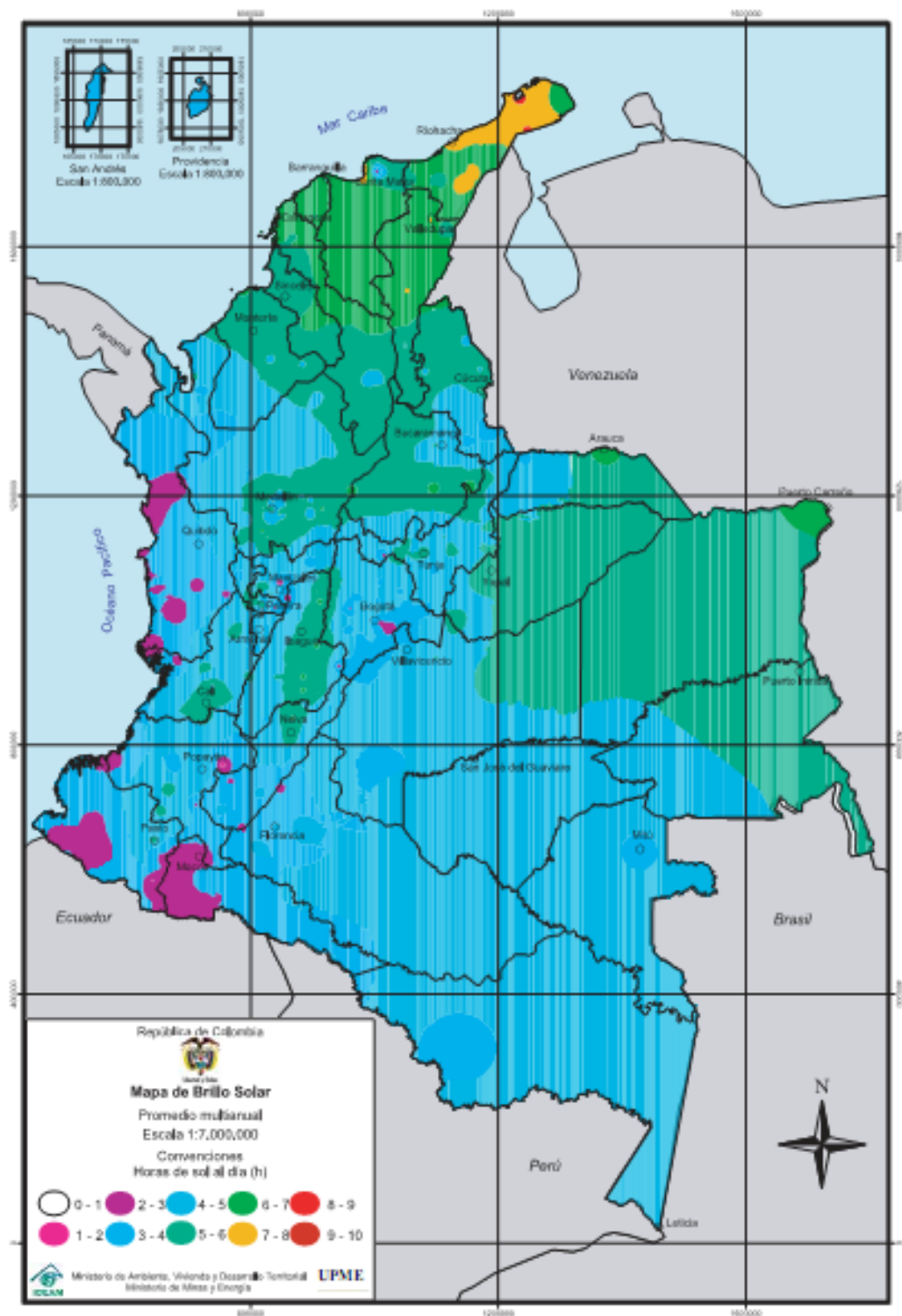
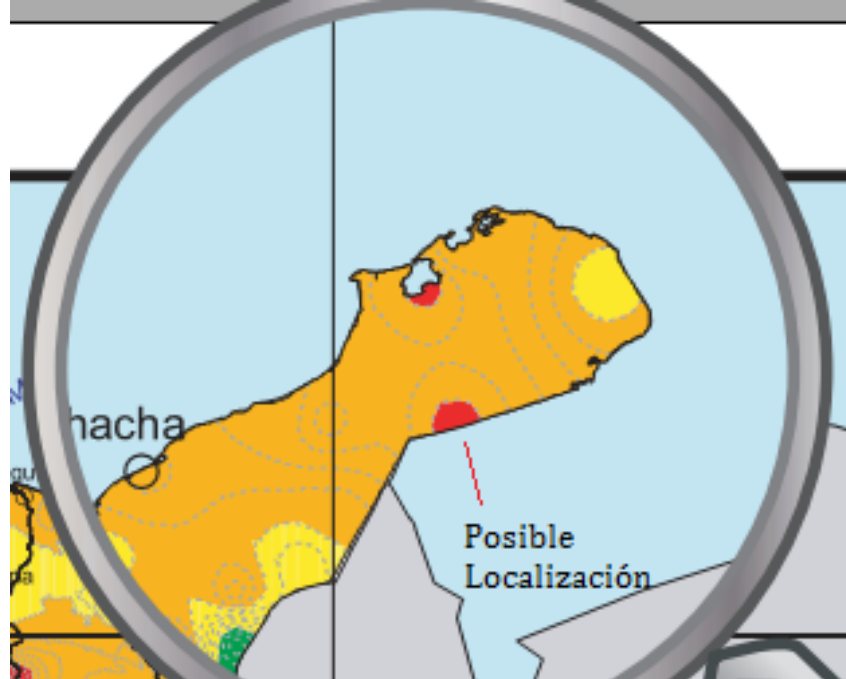


Figura 64. Mapa del promedio multianual de brillo solar de Colombia en horas. Tomado de: (13)



Luego de comparar los mapas de la Figura 63 y la Figura 64 se muestra en la Figura 65 la posible localización para la implementación de un sistema de generación usando el sistema Disco-Stirling.

Figura 65. Posible localización del proyecto de generación disco-Stirling. Adaptado de: (13)



La zona escogida tiene las siguientes características:

- Ubicación: Departamento de la Guajira
- Promedio Anual de Radiación Solar Diaria: 6,0-6,5 kWh/m²
- Promedio de Brillo Solar Diario: 8–9 Horas
- Temperatura Promedio Diaria: Mayor a 24 °C

5.2 CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Teniendo en cuenta la ubicación sugerida para la ubicación del proyecto y la cantidad de Energía Anual para el sistema *SunCatcher*[™] presentada en la Tabla 12 (página 99) se tiene:

Producción de Energía Anual: 54 500 kWh para irradiación de 7,1 kWh/m²/día

Teniendo en cuenta que la ubicación sugerida posee condiciones similares a las unidades instaladas y probadas en Estados Unidos (terrenos desérticos), se puede realizar una interpolación para la energía producida a partir de los valores de radiación diarios para obtener un estimado de la energía producida en la ubicación sugerida.

Tabla 17. Cantidad Estimada de Energía Producida Anual para la ubicación del proyecto sugerida.

Cantidad de Irradiación Solar Diaria [kWh/m ²]	Producción de Energía [kWh]
7,1	54 500
6,0	46 056
6,5	49 894

Con lo cual se observa que la producción de energía anual se podría aproximar a valores entre 46 054 y 49 894 kWh, para un sistema disco-*Stirling* funcionando solamente con energía solar.

5.3 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

Teniendo en cuenta las otras tecnologías de concentración se presenta un comparativo entre costos de operación y de energía para estos tipos de proyecto.

Tabla 18. Costos de las tecnologías solares térmicas. Tomado de: (21)

	Cilindro-Parabólico	Receptor Central	Discos Parabólicos
Costo de Instalación [US\$/kW]	2 800-3 200	4 000-4 500	10 000-12 000
Costo de Generación [US\$/kWh]	0,12-0,15	0,15-0,20	0,20-0,25

Los costos de la tabla están en valores del 2 004, y los están estimados para el periodo 1 997-2 030. Si bien los costos del Disco-*Stirling* son más altos, se obtiene mayor eficiencia del proceso.

6 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL MOTOR *STIRLING* – ENERGÍA GEOTÉRMICA

La generación de energía eléctrica con base en el motor *Stirling* a partir de la energía geotérmica no se considera una forma convencional de generación de energía. Las plantas de generación convencional de energía eléctrica con base en la energía geotérmica se instalan sobre reservorios y campos de media y alta entalpía, es decir donde el recurso geotérmico alcanza grandes temperaturas, el cual es apto para los ciclos usados tradicionalmente, cuyas plantas son altamente costosas y de gran tamaño. A diferencia de los recursos geotérmicos de alta temperatura, los de menor temperatura son usados generalmente para usos directos como calefacción de ambientes, fines recreativos y terapéuticos, y no se consideraban para proyectos de generación de energía eléctrica. Sin embargo con el nacimiento del motor *Stirling* de bajo diferencial de temperatura ó LDSE²⁹ se empezó a desarrollar interés en generar energía eléctrica con fuentes geotérmicas de baja temperatura. En la actualidad, existen varios modelos de LDSE usados en la generación de potencia eléctrica con base en fuentes geotérmicas, sin embargo los más avanzados y estudiados son el modelo de Ivo Kolin de intercambiadores de calor de “plato plano” ó “disco plano”³⁰ y el modelo de la Universidad de Saitama en el Japón. (60)

6.1 MOTOR *STIRLING* DE BAJO DIFERENCIAL DE TEMPERATURA LDSE

En 1 983, Ivo Kolin, un profesor de la Universidad de Zagreb en Croacia, mostró el primer motor *Stirling* que funcionaba con una fuente de calor más fría que la temperatura del agua en su punto de evaporación (61). El desarrollo del LDSE ha llegado al punto del funcionamiento del motor con diferencias de temperatura de hasta 0,5 °C. Este desarrollo inmediatamente inspiró la curiosidad en la posibilidad de generar potencia de algunas de

²⁹ Las siglas LDSE vienen de la forma abreviada en inglés de *Low Temperature Differential Stirling Engine*.

³⁰ Del inglés *Flat Plate*

las fuentes de calor de baja temperatura, tal como el calor de desperdicio en los procesos y el calor de los reservorios geotérmicos destinados hasta el momento para fines recreativos.

Es de vital importancia remarcar que los LDSE tienden a ser muy grandes en comparación con la cantidad de potencia que se obtiene de ellos. Sin embargo esto no se considera como un retroceso en la tecnología, ya que los LDSE pueden ser fabricados de materiales muy livianos y baratos como plásticos y espumas. (61)

Como la potencia del motor depende del cubo de la diferencia de temperatura, los pozos geotérmicos de elevada temperatura, con agua aproximándose al punto de ebullición, son particularmente aptas para motores *Stirling* LDSE (60), especialmente aquellos sitios donde la temperatura ambiente sea baja, en países con estaciones se obtienen mejores rendimientos en la época de invierno.

6.2 ESTADO DEL ARTE EN MOTORES LDSE

En la actualidad se han desarrollado principalmente dos tipos de motores LDSE para ser usados con base en la energía geotérmica, uno es el motor *Flat Plate* desarrollado por el profesor Ivo Kolin, el otro corresponde a modelos basados en la configuración gamma (γ), en cuya categoría se destaca por su desarrollo el motor creado en la Universidad de Saitama en Japón.

6.2.1 Flat Plate LDSE

El primer modelo del motor *Stirling Flat Plate* de bajo diferencial de temperatura fue presentado en 1982, el cual fue un modelo ideado por el profesor Ivo Kolin de la universidad de Zagreb, Croacia (62). En la Figura 66 se observa el modelo del profesor Kolin, la imagen del sol corresponde a la ubicación del lado de la fuente de calor.

Figura 66. Motor *Stirling* de Bajo Diferencial de Temperatura "Flat Plate" de Ivo Kolin. Tomado de: (62)



El motor consta de una cámara de trabajo en la cual se obtiene el diferencial de energía, en esta cámara se encuentra el pistón que a su vez hace el papel de regenerador que ayuda a la cinética del gas dentro de la cámara. La pared del lado frío de la cámara contrapuesto a la pared del lado caliente está diseñada como una membrana plástica que se estira y se contrae en las diferentes etapas del ciclo. El pistón y la membrana plástica están unidos a un disco de inercia que gira según el movimiento de estos elementos.

La descripción del proceso para este motor es la siguiente(63):

Fase 1 a 2

- El gas en la cámara de trabajo será comprimido bajo enfriamiento por el trabajo hecho por parte del pistón. El pistón se mantiene en el lugar caliente.

Fase 2 a 3

- A este momento el pequeño volumen de gas frío lleva el pistón del lado caliente al lado frío. El aire corre a través del pistón/regenerador y toma calor.

Fase 3 a 4

- El aire calentado se expande y presiona la membrana hacia fuera ligeramente. Este tipo de movimiento será llevado por el disco y se transforma en la fuerza de trabajo. El aire se expande a su máximo en el lugar caliente.

Fase 4 a 1

- El pistón se dobla por el gran volumen de gas caliente desde el lado frío al lado caliente. El gas caliente corre a través del regenerador hacia el lado frío entregándole calor. Luego se vuelve a la fase 1.

Este motor no ha sido ampliamente usado debido a su falta de I+D en aspectos de mejoras de eficiencia y trabajo neto desarrollado por la máquina, además de la complejidad en su construcción.

6.2.2 Modelo de la Universidad de Saitama – Japón

Este modelo de motor *Stirling* es el más usado y el que mejores resultados ha dado en el mundo para el uso como generador de energía con base en la energía geotérmica de baja temperatura. Este modelo fue desarrollado por el grupo de investigación “*Stirling Engines*” de la Universidad de Saitama, Japón (64). El modelo de 300 W mostrado en funcionamiento en la Figura 67, fue diseñado y desarrollado específicamente para funcionar a base de agua como fuente de calor, ya sea extraída de un acuífero geotérmico o residual de algún proceso (usada para enfriamiento en algún proceso). En la Figura 68 se observa un esquema del motor, con sus partes principales.

Tabla 19. Principales aspectos del motor de la Universidad de Saitama. Tomado de: (65)

Configuración del Motor	Gamma (γ)	
Pistón de Potencia	Volumen Barrido	25 100 cm ³
	Calibre	400 mm
	Recorrido	100, 150, 200 mm
	Material	Aluminio
	Mecanismo de Acople	Tipo Scotch
Desplazador	Volumen Barrido	40 200 cm ³
	Calibre	800 mm
	Recorrido	80 mm
	Material	Espuma Uretano
	Mecanismo de Acople	Biela

Figura 67. LDSE de 300 W de la Universidad de Saitama en Japón. Tomado de: (64)

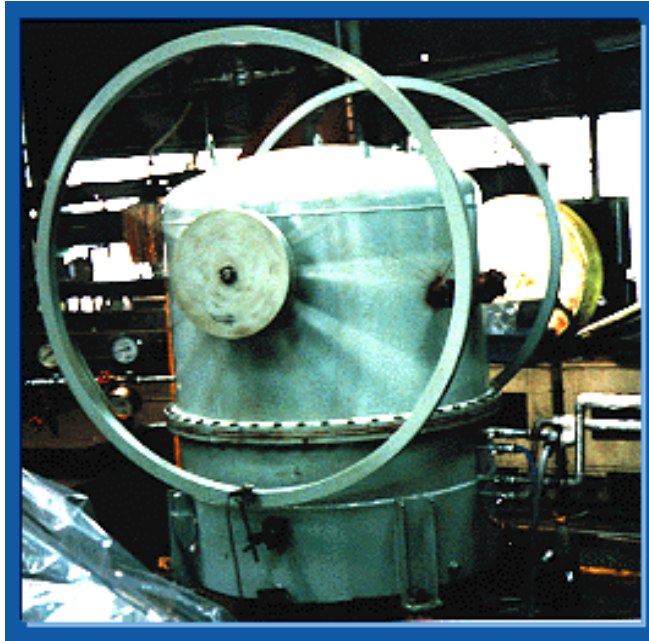
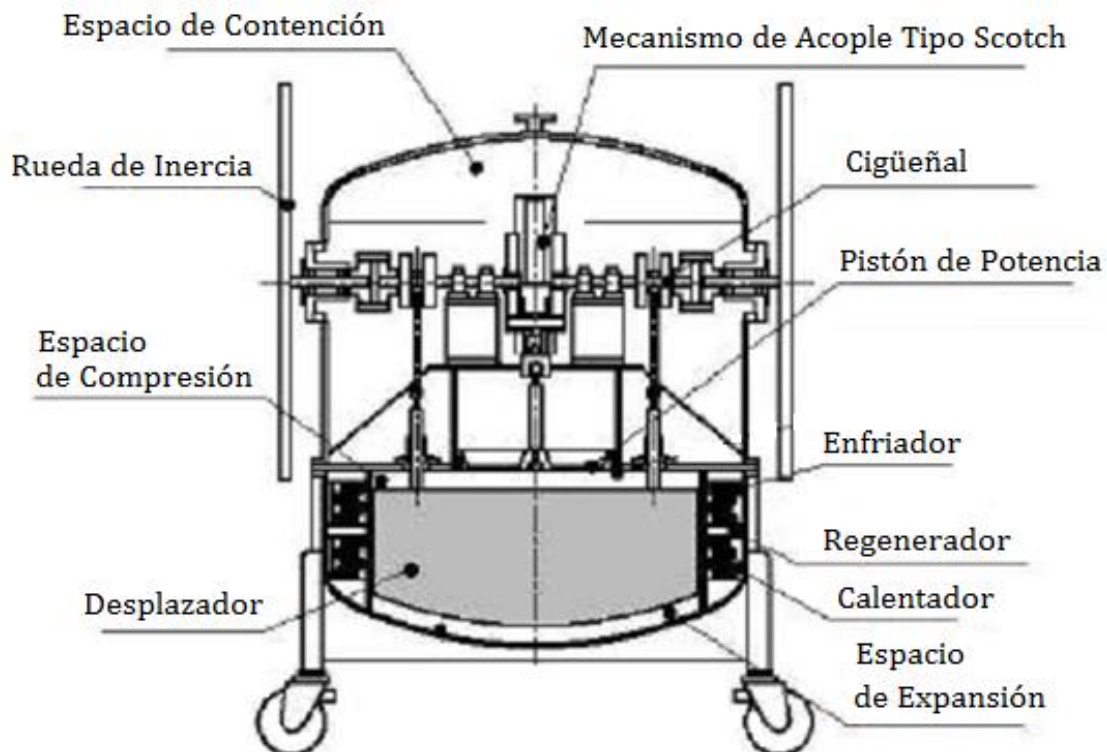


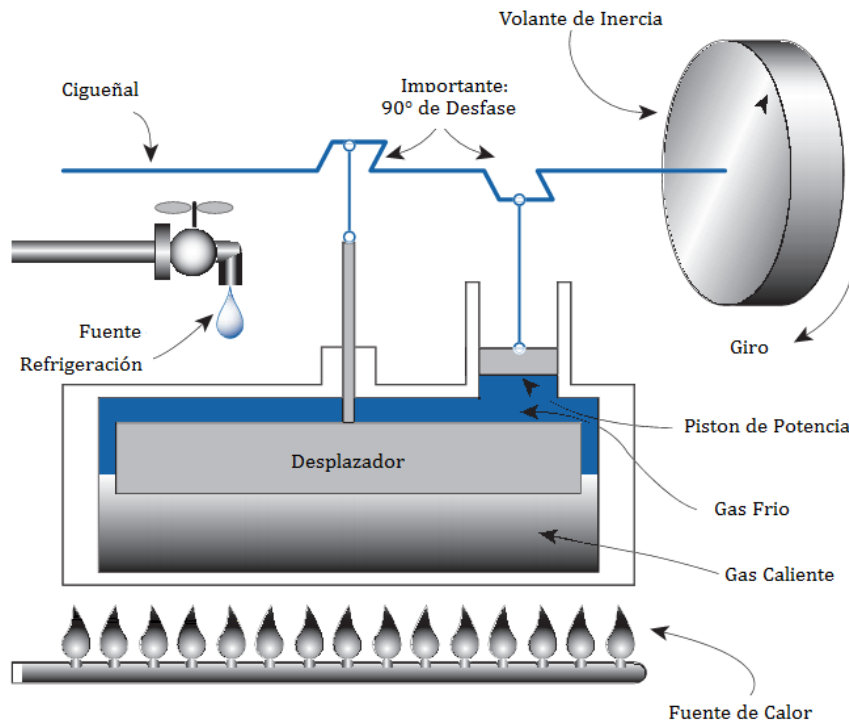
Figura 68. Vista esquemática del LDSE de 300 W de la Universidad de Saitama. Tomado de: (65)



6.2.2.1 Configuración del motor.

A diferencia del modelo Flat Plate, el modelo de la universidad de Saitama tiene un diseño de cilindro clásico en una configuración Gamma (γ). El motor de bajo diferencial de temperatura LDSE de la universidad de Saitama está compuesto de un desplazador, un pistón de potencia y los intercambiadores de calor. Se usa la configuración gamma (γ) debido a que en ésta se puede mantener una mayor área de transferencia de calor con los intercambiadores. Esta configuración se muestra en el esquema básico de la Figura 69.

Figura 69. Configuración Gamma usada en el motor *Stirling* de la Universidad de Saitama. Tomado de: (66)



6.2.2.2 Acoplamiento mecánico

El acoplamiento mecánico con el cigüeñal es del tipo *Scotch*. Este tipo de acoplamiento mecánico hace más rígido al ensamble del cigüeñal, al tiempo que decrece las fuerzas laterales en el pistón de potencia. Este tipo de mecanismo no usa ningún tipo de artefacto de lubricación, la lubricación para el mecanismo se realiza a través del engrasado de los rodamientos. El mecanismo del cigüeñal está cubierto por un tanque de contención, por lo cual la máquina puede ser presurizada por encima de la presión atmosférica.

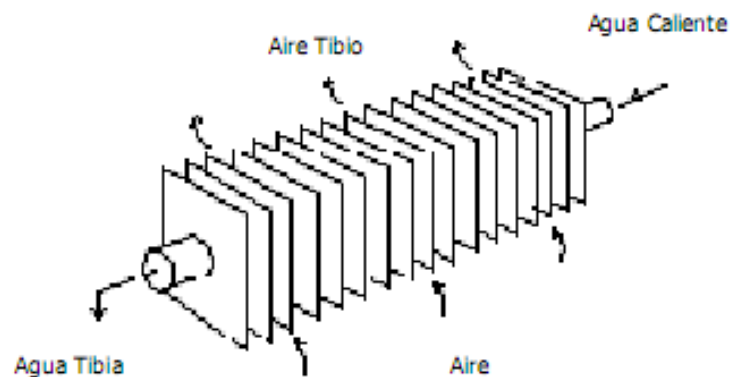
Figura 70. Acoplamiento Mecánico del Motor al cigüeñal tipo Scotch. Tomado de: (64)



6.2.2.3 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se encuentran localizados alrededor del cilindro del desplazador, como se muestra en el esquema de la Figura 68, al igual que el regenerador. Los intercambiadores de calor, tanto de calefacción como de enfriamiento, son de tipo radiador tubular con aletas, es decir son tubos con aletas por los que pasa el agua caliente para el foco caliente y el agua fría para el foco frío. El gas de trabajo fluye de los radiadores hacia la máquina, ya sea calentado o refrigerado(65), un ejemplo de este tipo de intercambiador de calor se observa en la Figura 71.

Figura 71. Radiador tubular con aletas usado como intercambiador de calor. Tomado de: (26)



En la Tabla 20 se muestran las especificaciones de los intercambiadores de calor del motor *Stirling* de 300 W de la Universidad de Saitama, una foto del detalle del espacio de expansión de la máquina junto con la ubicación de los intercambiadores de calor se muestra en la Figura 72.

Tabla 20. Especificaciones de los Intercambiadores de Calor del motor *Stirling* de 300 W de la Universidad de Saitama. Tomado de: (64)

Calentador	Volumen	14 866,3 cm ³
	Tipo	Tubo – Aleta
	Material	Cobre
	Número de Tubos	8
	Paso de Aleta	3,2 mm
Enfriador	Volumen	14 866,3 cm ³
	Tipo	Tubo – Aleta
	Material	Cobre
	Número de Tubos	8
	Paso de Aleta	3,2 mm
Regenerador	Volumen	2 424,6 cm ³
	Tipo	Matriz Laminada de Alambre
	Material	Recubrimiento de Alambre de Bronce
	Malla	50

Figura 72. Fondo del motor *Stirling* de 300 W de la Universidad de Saitama y ubicación de los intercambiadores.
Tomado de: (64)



6.2.2.4 Pistón de potencia

El pistón de potencia usado en este modelo de motor está construido enteramente en aluminio. Se considera de dimensiones grandes, el cilindro tiene un diámetro de 400 mm y un recorrido máximo para el pistón de 200 mm, sin embargo la altura del pistón es corta en relación con el cilindro con 60 mm. El pistón usa un anillo de una sola vía, con el uso del cual, se aumenta la mínima presión al interior de la máquina con lo cual se aumenta el trabajo neto del motor.

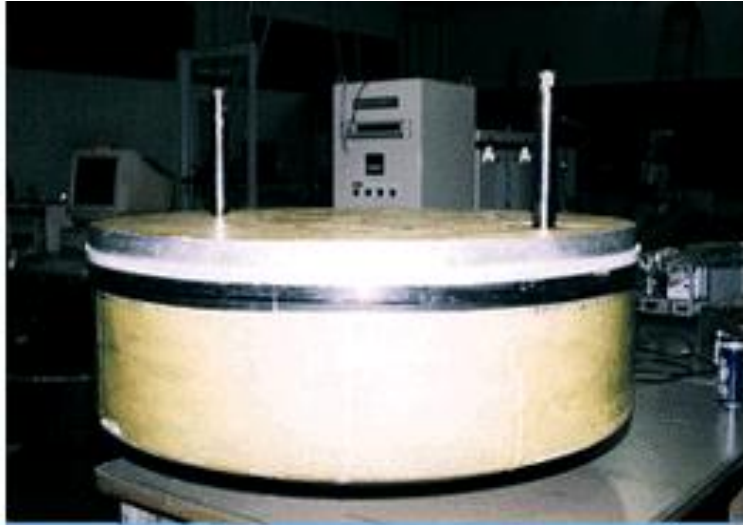
Figura 73. Pistón de potencia del motor *Stirling* de 300 W de la Universidad de Saitama. Tomado de: (64)



6.2.2.5 Pistón desplazador

Para esta máquina se usó un pistón desplazador fabricado en espuma de poliuretano. Este material se usó no solamente por su ligero peso, sino porque ofrece un buen aislamiento entre los espacios caliente y frío, mejorando así el rendimiento general del motor al obligar a pasar el gas por los intercambiadores de calor de la máquina, además al pistón se le ha agregado un anillo con el fin de evitar fugas del gas de trabajo de espacio a espacio. Las dimensiones del pistón son grandes comparadas con el pistón de potencia, ya que este tiene un diámetro de 800 mm y una altura de 350 mm, sin embargo tiene un recorrido más corto de 80 mm.

Figura 74. Pistón desplazador de la máquina de 300 W de la Universidad de Saitama. Tomado de: (64)



7 CONSIDERACIONES TÉCNICO-ECONÓMICAS DEL LDSE A PARTIR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA

7.1 ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA

Dadas las características geográficas de Colombia, cruzada de sur a norte por un sistema montañoso compuesto por tres cordilleras con manifestaciones volcánicas muy importantes, el país tiene grandes posibilidades de generar electricidad mediante la utilización del recurso geotérmico. La explotación de recursos geotérmicos en Colombia ha estado limitada al aprovechamiento de los termales para fines recreativos y terapéuticos, especialmente en el altiplano cundiboyacense y en el eje cafetero. No hay ninguna aplicación para la generación de energía eléctrica, aunque se han realizado algunos estudios de prefactibilidad y de factibilidad para generar mediante las tecnologías convencionales en algunos sitios identificados, no se le ha dado el impulso a ninguno de estos. El interés por la energía geotérmica en Colombia nace en el año de 1968 mediante un estudio preliminar sobre las posibilidades geotérmicas en el Macizo Volcánico del Ruiz. Este estudio fue resultado de un convenio entre la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) y el *Ente Nazionale per l'Energia Elettrica* (ENEL), mediante el cual se realizó un reconocimiento de posibles fuentes geotérmicas en un área que incluyó los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda, Antioquia y Tolima. Posteriormente en el año de 1980, la CHEC adelantó una etapa de prefactibilidad en el área antes mencionada, que incluía estudios de geoquímica, hidrogeología y geofísica. Dicha etapa arrojó resultados atractivos en lo que tiene que ver con la fuente de calor, pero cierta incertidumbre dada la permeabilidad de formaciones rocosas que eventualmente podrían servir como reservorio geotérmico (21).

Hacia el año 1981, el Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL), en conjunto con la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), realizaron un inventario geotérmico en los departamentos de la zona andina y algunas regiones de la Costa Atlántica. El resultado de este inventario fue la determinación de tres áreas prioritarias para las cuales se

recomendó adelantar estudios de mayor detalle. (12) En orden de prioridad las son las siguientes:

1. Azufraal de Túquerres en el departamento de Nariño, que luego se denominó Proyecto de Azufraal
2. Chiles – Cerro Negro en la frontera con Ecuador, también en el departamento de Nariño, que posteriormente se identificó como proyecto geotérmico binacional Chiles – Cerro Negro – Tufiño
3. Paipa – Iza en el departamento de Boyacá, que se identifica con el proyecto Paipa

En la Figura 75 se presentan los lugares considerados como los de mayor potencial para el aprovechamiento de la energía geotérmica en Colombia.

Figura 75. Mapa de Desarrollos Geotérmicos. Tomado de: (21)



En la Tabla 21 se presenta a manera de resumen la prioridad de explotación y las manifestaciones hidrológicas de las principales fuentes geotérmicas localizadas en el territorio colombiano.

Tabla 21. Localización y características de las principales fuentes geotérmicas en Colombia. Tomado de: (21)

Área	Departamento	Manifestaciones	Potencialidad
Chiles – Cerro Negro	Nariño	Agua a 52 °C Fugas de Boro	Alta
Azufral de Túquerres	Nariño	Fumarolas internas (58-90 °C)	Alta
Doña Juana	Nariño	(37-63°C) Fugas de vapor amoníaco	Reservorio desconocido
Grupo Sotará	Cauca	Temperatura 150-160 °C	Reservorio desconocido
Puracé	Cauca	Temperatura 150-160 °C	Reservorio desconocido
Paipa	Boyacá	Temperatura 52-172 °C	Media-Alta
Cerro Bravo	Nariño	Anomalía térmica superficial	Alta
Nevado del Ruiz-Santa Isabel	Caldas	Manifestación hidrotermal (150-250 °C)	Alta
Cerro España	Caldas	Presencia de una cámara magmática superficial. Anomalía térmica pronunciada	Alta
Machín	Huila	Cámara magmática superficial. Manifestaciones termales con temperaturas 150-180 °C Anomalía térmica importante	Alta

Las investigaciones realizadas hasta el momento en Colombia sólo incluyen estudios de reconocimiento y prefactibilidad, por lo cual es de suma importancia formular planes de investigación que involucren el análisis exhaustivo de la capacidad de los reservorios (etapa de factibilidad), tanto para proyectos de gran magnitud y generación convencional como de pequeños de proyectos para calefacción de ambientes y generación de

electricidad (por ejemplo mediante el uso del motor *Stirling*), así como las formas más eficientes de explotar el fluido geotérmico. Por ahora se le han dado usos directos a los recursos geotérmicos (principalmente para actividades como nadar o bañarse), y se ha hecho una estimación de la capacidad de la energía usada (para calentamiento directo), la cual se presenta en la Tabla 22, para la cual se han seleccionado aquellos yacimientos hidrotermales con temperaturas superiores a 60 °C, que representan las opciones más viables para la implementación de unidades de generación usando el motor *Stirling*.

Tabla 22. Utilización de Energía Geotérmica para Calentamiento Directo. Tomado de: (26)

Localidad	Tipo	Utilización Máxima			Utilización Anual			
		Caudal	Temperatura °C		Capacidad	Flujo Promedio	Energía	Factor de Capacidad
		Kg/s	Entrada	Salida	MWt	Kg/s	TJ/año	
Coconuco	B	2,32	71	35	0,349	1,47	6,980	0,633
Machetá	B	3,22	61	35	0,350	2,04	6,996	0,633
Paipa	B	2,26	72	35	0,350	1,43	6,979	0,633
Santa Rosa	B	1,86	80	35	0,350	1,18	7,004	0,634
Tajumbina	B	3,1	62	35	0,350	1,97	7,016	0,635
Villamaría	B	2,99	63	35	0,350	1,9	7,017	0,635

Tipo: B Usos para baño y nado incluyendo balneología

Capacidad (MWt)=Máximo caudal (Kg/s)x(temperatura de entrada °C- temperatura de salida °C)x0.004184

Uso de energía (TJ/año)= Caudal promedio (Kg/s)x(temperatura de entrada °C -temperatura de salida °C)x0.1319

Factor de capacidad= (Uso de energía anual (TJ/año) x 0.03171)/ capacidad (MWt)

Considerando la Tabla 21 y la Tabla 22, además de contar con un clima frío (temperatura anual promedio de 14°C) durante todo el año y contar con disponibilidad de agua para refrigeración, se considera a la región de Paipa como una región idónea para la implementación de unidades de generación con base en el motor *Stirling* LDSE.

7.2 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MOTOR LDSE PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Al ser aún un motor experimental, no se ha desplegado en fase comercial y no se han obtenido datos de costos de inversión inicial, costos de operación y mantenimiento y costo de la energía.

Sin embargo, se pueden realizar algunas aseveraciones sobre el diseño y construcción de la máquina que pueden servir como referencia:

- Se tiene un diseño básico de un motor probado y en funcionamiento, lo que permite realizar una adaptación del diseño según sea el requerimiento de potencia y las condiciones posibles de funcionamiento.
- Los materiales usados en la fabricación del motor son de fácil consecución y/o construcción, no teniendo así la necesidad de importar piezas. Además se tiene la facilidad de realizar la construcción y ensamble de la máquina localmente.
- Ivo Kolin asegura en su artículo “Geothermal electricity production by means of the low temperature difference *Stirling* engine” que para un mismo nivel de potencia, un motor LDSE requiere menores costos de inversión y mantenimiento que un motor HDSE (60). Incluso a pesar de que el LDSE sea menos eficiente que el HDSE y ocupe mucho mayor espacio.
- El uso del recurso geotérmico usado, en este caso agua de los manantiales a elevadas temperaturas, de igual manera puede seguir siendo aprovechado para los usos directos para los cuales ha sido explotado, por ejemplo para efectos de balneología, hidroterapia, recreación y calefacción de ambientes; lo que implica que al desarrollar un proyecto de este tipo, además de aprovechar el recurso en la forma tradicional, se puede obtener una ganancia en términos de energía.
- Los costos de operación y mantenimiento no son tan altos, debido a que en el interior de la máquina no se presenta ningún tipo de explosión, aunque se debe tener especial cuidado con el intercambiador del foco del lado caliente, ya que está en contacto con aguas con contenidos salinos.
- Es ambientalmente amigable, ya que no produce emisiones de gases tipo invernadero, y generalmente son motores silenciosos.

7.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA ESTIMADA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN

Con base en las consideraciones económicas presentadas en la sección anterior y en procura de un estudio económico que refleje mejor la conveniencia de la inversión en una unidad de generación se ha realizado un análisis financiero. Este análisis se ha hecho con estimaciones de costos del equipo, de operación y mantenimiento, y estimaciones del costo de energía ahorrada; para la evaluación se ha considerado una vida útil de 10 años para el proyecto.

El costo de la unidad de generación de 1 kW (motor, generador, equipo de control, equipo de monitorización) es de \$10 000 000, y los costos de mantenimiento que se muestran en la Tabla 23, a los cuales se les aplica el IPP anual de 7,93%. La unidad de generación tendría una utilización de 18 horas diarias, para la valoración se tuvo en cuenta la necesidad de mantener las motobombas y la iluminación en el área de la piscina. La tarifa de energía a nivel comercial³¹ se consideró la misma que aplica la ESSA y tiene un valor de \$399,569 con un incremento anual de 15,57%, sin tener en cuenta cargos por uso de potencia reactiva.

Tabla 23. Resumen de costos de mantenimiento

Mantenimiento	Periodicidad en años	Costo Unitario Presente
Cambio Pistón de potencia	3	\$ 1.000.000
Cambio Desplazador	5	\$ 300.000
Cambio Anillos	1	\$ 100.000
Cambio Cilindros	5	\$ 300.000
Mantenimiento de Rutina	1	\$ 100.000
Cambio Intercambiadores	2	\$ 200.000
Rebobinado Generador	4	\$ 400.000

En la Tabla 24 se presenta un resumen de las cifras consideradas para el proyecto.

³¹ Fuente: (85)

Tabla 24. Resumen de costos y ahorros del proyecto de generación con energía geotérmica

ÍTEM	VALOR
Potencia Nominal de la Unidad	1 kW
Compra Equipo de Generación	\$ 10.000.000
Energía Mensual	540 kWh
Tarifa de Energía \$/kWh	\$ 399,569
Ahorro Energía Mensual	\$ 215.767
Ahorro Energía Anual	\$ 2.589.207

En la Tabla 25 se presenta el análisis financiero del proyecto.

Tabla 25. Análisis financiero del proyecto de generación Stirling-energía geotérmica

Periodo	Costos	Ahorros	Total	VP (con inflación anual)	VPN
0	\$ 10.000.000	\$ 0	-\$ 10.000.000	-\$ 10.000.000	-\$ 10.000.000
1	\$ 215.860	\$ 2.589.207	\$ 2.373.347	\$ 2.198.969	-\$ 7.801.031
2	\$ 465.955	\$ 2.992.347	\$ 2.526.391	\$ 2.168.784	-\$ 5.632.247
3	\$ 1.508.717	\$ 3.458.255	\$ 1.949.538	\$ 1.550.619	-\$ 4.081.628
4	\$ 1.085.572	\$ 3.996.705	\$ 2.911.133	\$ 2.145.326	-\$ 1.936.302
5	\$ 1.171.658	\$ 4.618.992	\$ 3.447.334	\$ 2.353.816	\$ 417.514
6	\$ 2.212.998	\$ 5.338.169	\$ 3.125.171	\$ 1.977.064	\$ 2.394.578
7	\$ 341.213	\$ 6.169.322	\$ 5.828.110	\$ 3.416.115	\$ 5.810.693
8	\$ 1.473.084	\$ 7.129.886	\$ 5.656.802	\$ 3.072.088	\$ 8.882.781
9	\$ 2.384.849	\$ 8.240.009	\$ 5.855.160	\$ 2.946.180	\$ 11.828.961
10	\$ 0	\$ 9.522.979	\$ 9.522.979	\$ 4.439.674	\$ 16.268.634
TIR			29,05 %		

Como se observa en la Tabla 25 el proyecto tiene una TIR de 29,05 %, lo que al índice de inflación anual esperada para los próximos 10 de años, que para el análisis es de un 7 %. Si se presta atención a la columna del VPN (teniendo en cuenta que se calculó con la tasa de inflación), se puede observar que la inversión se recupera en un poco más de 4 años.

CONCLUSIONES

El motor *Stirling* es un motor térmico que presenta una alta eficiencia, no sólo teórica, sino demostrada en máquinas reales, se caracteriza por ser un motor exotérmico, de ciclo cerrado, lo que lo convierte en un motor silencioso además de ser una máquina que no requiere de mucho mantenimiento (comparado con un motor de combustión interna), y aunque, en general no produce un gran torque, es ideal en la generación de energía eléctrica a pequeña escala, ya sea de sólo electricidad o en unidades combinadas de calefacción y potencia.

La generación de energía eléctrica usando el motor *Stirling* se presenta como una alternativa para reemplazar tecnologías existentes en un futuro cercano debido a la variedad de fuentes de energía renovables que se pueden usar. Esto ante las actuales políticas ambientales y energéticas del planeta es una gran ventaja y/o se presenta como una de las soluciones en la transición hacia las energías renovables, la descontaminación del planeta y el inminente agotamiento de los combustibles fósiles.

Una de las alternativas *Stirling* para uso con energías renovables es la energía solar térmica. Esta tecnología es madura y desarrollada. Sin embargo para la comercialización para el año 2010, el sistema SunCatcher™, todavía se considera costosa. Su desarrollo de más de 25 años lo ha mostrado como el sistema Disco-*Stirling* más aventajado en cuanto a eficiencia, energía producida, desarrollo de materiales y facilidad de instalación y mantenimiento, lo que lo convierte en el candidato idóneo para la implementación en un proyecto de generación solar térmico. En el país se considera que existen condiciones aptas para la realización de un proyecto de este tipo, el departamento de la Guajira, donde se tienen los niveles más altos de radiación solar (entre 6 y 6,5 kWh/m² diario). Allí si bien los niveles no son tan altos como en las zonas desérticas de los Estados Unidos (entre 7,0 y 7,5 kWh/m² diario), puede ofrecer una aceptable cantidad de energía eléctrica

anual producida. La implementación de un proyecto de este tipo, puede traer consecuencias benéficas para las comunidades cercanas, porque podrían tener energía eléctrica que les provea servicios de iluminación y agua (alimentando motobombas que pueden traer el agua de sitios lejanos o de aguas subterráneas). Además de regalías y beneficios otorgados por el gobierno nacional y las empresas privadas ligadas al proyecto. A las entidades vinculadas les puede traer beneficios al ser generadores de energía limpia de acuerdo con los estímulos otorgados por la ley colombiana (tanto a nivel económico y tributario como a nivel educativo e investigativo). Se considera por lo tanto, necesario realizar la implementación de una planta prototipo basada en el sistema *Disco-Stirling*, manteniendo el firme propósito de estar permanentemente formulando propuestas y proyectos de investigación para realizar mejoras a la tecnología y adaptándola a las condiciones dadas en el territorio colombiano, e impulsar y promover las energías renovables en el territorio nacional.

La otra opción *Stirling* considerada específicamente en este proyecto es la geotérmica, para la cual se plantea principalmente el motor LDSE, que se emplea para recursos geotérmicos de media y baja temperatura (principalmente de origen manantial que son los más abundantes). Esta es una tecnología menos difundida y desarrollada que las tecnologías usadas con energía solar. Las pocas experiencias que se conocen están aún en etapa de pruebas y no han contado con el apoyo necesario de los gobiernos para masificar su uso. Se trata de una tecnología relativamente simple, con excelentes posibilidades de desarrollo y optimización, materiales económicos, facilidad de construcción local, bajos costos de operación y mantenimiento, y se puede seguir utilizando el recurso geotérmico para su función original (terapéutico, recreacional o de calefacción). El país dispone de una buena cantidad de recurso geotérmico usado principalmente para actividades turísticas, recreativas y terapéuticas; y en este aspecto es ideal para el desarrollo de un proyecto de este tipo, ya que además de aprovechar el recurso geotérmico en la forma tradicional, se puede obtener una ganancia en términos de energía. Se recomienda como ubicación explotable en este sentido la región de Paipa en Boyacá, debido a la

temperatura y caudal del recurso geotérmico; además de la ventaja de tener una temperatura ambiente baja, gran infraestructura turística y hotelera (en torno a las aguas termales), y con industria metalmecánica especializada (en Boyacá a 15 minutos de Paipa) apta para la construcción de las piezas y armazón de la máquina. Se recomienda implementar un sistema de generación piloto con el fin de optimizar y desarrollar un modelo básico, que pueda ofrecer ventajas para su comercialización. El diseño y desarrollo debe lograrse mediante la formulación de proyectos de investigación, con el apoyo de entidades dedicadas a la promoción de la investigación y desarrollo como COLCIENCIAS y de entidades dedicadas a la promoción de energías renovables como los ministerios de minas y energía y del medio ambiente y la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía, CIURE.

Con la implementación de estas tecnologías se podría lograr una revolución en términos de energías renovables en el país, y de esta forma lograr el aprovechamiento de toda la riqueza energética que posee el país.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Energy for Tomorrow's World - Acting Now*. **WORLD ENERGY COUNCIL**. Londres : s.n., 2000.
2. **CIEMAT**. *Tecnologías energéticas e impacto ambiental*. Madrid : McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U., 2001.
3. **CONGRESO DE COLOMBIA**. Ley 697. Bogotá : s.n., 3 de Octubre de 2001.
4. **UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA - UPME**. *Boletín estadístico de minas y energía 2002-2007*. Bogotá D.C. : s.n., 2007.
5. **WIKIPEDIA**. Sol. [En línea] [Citado el: 30 de Noviembre de 2008.] http://es.wikipedia.org/wiki/Disco_solar#Estructura_del_Sol.
6. **NASA**. NASA-Sun. [En línea] [Citado el: 30 de Noviembre de 2008.] http://www.nasa.gov/worldbook/sun_worldbook.html.
7. Visual Merriam Webster. *Celestial Bodies - Sun Structure*. [En línea] http://visual.merriam-webster.com/astronomy/celestial-bodies/sun/structure-sun_2.php.
8. **KNOL**. Sun - Un knol de Sergio Riquelme Sanchez. [En línea] [Citado el: 30 de Noviembre de 2008.] <http://knol.google.com/k/sergio-riquelme-sanchez/sun/180d1emjyzvivi/6#>.
9. **RODRIGUEZ, MARIO ORTEGA**. *Energías renovables*. 2ª edición. Madrid : Thomson - Paraninfo, 2003.
10. **DUFFIE, JOHN y BECKMAN, WILLIAM**. *Solar engineering of thermal processes*. 2ª edición. New York : Wiley-Interscience, 1991.
11. Global Warming Art. [En línea] http://www.globalwarmingart.com/wiki/Image:Solar_Spectrum_png.

12. **UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.** *Energía: sus perspectivas, su conversión y utilización en Colombia.* Bogotá : TM Editores e Impresores Ltda., 1998.
13. **IDEAM, UPME.** *Atlas de Radiación Solar de Colombia.* Bogotá : s.n., 2005.
14. **CEDIC - Infocobre.** Energías Renovables - Sistemas solares térmicos de baja temperatura. Curso para instaladores. [En línea]
<http://www.infocobre.org.es/doc/uploaded/File/CursoParaInstaladores.pdf>.
15. **PhysicalGeography.net.** Fundamentals eBOOK - Chapter 6: Energy and Matter - (h). Earth-Sun Geometry. [En línea]
<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/6h.html>.
16. **Sustainable Energy Science and Engineering Center.** Florida State University-Solar Radiation. [En línea]
<http://www.sesec.fsu.edu/documents/lectures/ECS2006/SolarRadiation.pdf>.
17. *The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills.* **Cooper, P.I.** 3, 1969, Solar Energy, Vol. 12, págs. 333-346.
18. **Florida State University.** Meteorolgy Course. [En línea]
<http://ahlquist.met.fsu.edu/courses/met1010/materials/ch03.pdf>.
19. [www.Construmatica.com.](http://www.construmatica.com) *Carta Solar Cilindrica.* [En línea]
<http://www.construmatica.com/actualidad/blogs/2008/01/08/carta-solar-cilindrica>.
20. **Universidad Nacional de Colombia.** *Energía: sus perspectivas, su conversión y utilización en Colombia.* Bogotá : TM Editores e Impresores Ltda., 1998.
21. **ISAGEN.** *Fuentes no convencionales de generación de electricidad.* [ed.] Sergio Botero, Farid Chejne y Jorge Luis Rodríguez. Bogotá : s.n., 2005.
22. **Schlager, Neil y Weisblatt, Jayne, [ed.].** *Alternative Energy.* Farmington Hills : Thomson Gale, 2006.

23. **ASTM International.** Designation: E 957 – 03; Standard Terminology Relating to Geothermal Energy. 2003.
24. *Report of the IGA to the UN Commission on Sustainable Development, Session 9 (CSD-9).* **IGA: INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION.** New York : s.n., 2001.
25. **Shepherd, W. y Shepherd, D. W.** *Energy Studies.* Segunda edición. London : Imperial College Press, 2003.
26. **UPME - Unidad de Planeación Minero Energética.** *Utilización de la Energía Geotérmica - Documento Descriptivo.* Bogotá D.C. : s.n., 2003. FORMULACION DE UN PROGRAMA BASICO DE NORMALIZACIÓN PARA APLICACIONES DE ENERGIAS ALTERNATIVAS Y DIFUSION .
27. **WIKIPEDIA.** Motor Stirling. [En línea] http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_Engine.
28. **ÁLVAREZ FLÓREZ, JESÚS ANDRÉS y CALLEJÓN AGRAMUNT, ISMAEL.** *Máquinas térmicas motoras.* Barcelona : Ediciones UPC - Alfaomega, 2005. 970-15-1027-5.
29. **Haywood, David.** An introduction to Stirling cycle machines. [En línea] http://www.mech.canterbury.ac.nz/documents/sc_intro.pdf , University of Canterbury.
30. **Solarpaces.org.** Solar Dish Engine. [En línea] http://solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_dish.pdf.
31. **Schlaich Bergermann und Partner.** EuroDish System Description. [En línea] www.sbp.de/es/html/contact/download/EuroDish_System_Description.pdf.
32. **National Solar Energy Centre.** CISRO-Australia. *Solar Technologies.* [En línea] http://www.det.csiro.au/science/r_h/images/NSEC_Solar%20Power%20and%20Technologies.pdf.
33. **Sclaich Bergermann und Partner.** Los sistemas disco Stirling. [En línea] <http://www.sbp.de/es/html/solar/dish-stirling.html>.

34. *Solar-Electric Dish Stirling Development*. **Mancini, Thomas R.** Albuquerque : s.n., 1997.
35. **Plataforma Solar de Almería.** Informe Técnico Anual 2007. [En línea]
<http://www.psa.es/webesp/techrep/2007/index.html>.
36. Wikimedia - Advanco Dish Stirling System. [En línea]
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ADVANCO_Dish_Stirling_System.jpg.
37. **Electric Power Research Institute.** *Performance of the Vanguard Solar Dish-Stirling Engine Module*. 1986. AP 4608.
38. **Geyer, Michael.** Dish Stirling Activities at Schlaich Bergermann und Partner. *Workshop at NREL March 7, 2007*. [En línea]
http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/geyer_sbp_dish_stirling.pdf.
39. StirlingEngines.org. CPG. [En línea] <http://www.stirlingengines.org.uk/sun/sola4.html>.
40. **Sandia National Laboratories.** EnergyLan Media. [En línea]
<http://www.energylan.sandia.gov/photo/photos/0156/015635d.jpg>.
41. **Sun Lab.** SAIC/STM Utility-Scale Joint Venture Project. [En línea] 1999.
<http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/PDFs/usjvp.pdf>.
42. **Ohio University.** Stirling Engines. [En línea]
<http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/engines/engines.html>.
43. **Sun Lab.** UNLV Solar Dish-Engine Demonstration. [En línea] 2001.
<http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/PDFs/unlvdi.pdf>.
44. **Masters, Gilbert.** *Renewable and efficient electric power systems*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2004. ISBN: 0-471-28060-7.
45. **Stirling Sun Power International.** [En línea]
<http://www.stirlingsunpower.com/references.html>.

46. *Solar's New Dawn*. **Hutchinson, Alex**. 11, Noviembre de 2008, Popular Mechanics, Vol. 185, págs. 62-67.
47. **Sun Lab**. The Boeing/SES DECC Project. [En línea] 2001. <http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/PDFs/boeing.pdf>.
48. Stirling Energy Systems. [En línea] <http://www.stirlingenergy.com>.
49. Solarsphere. [En línea] <http://www.seao2.com/solarsphere/csp.htm>.
50. Pure Energy Systems. [En línea] http://pesn.com/2005/08/11/9600147_Edison_Stirling_largest_solar/.
51. *Stirling Energy Systems (SES) Dish Stirling Program*. **Stone, Kenneth, y otros**. Honolulu : s.n., 1997. Energy Conversion Engineering Conference, 1997. IECEC-97. Proceedings of the 32nd Intersociety. págs. 1039 - 1044 vol.2.
52. **Stone, Kenneth y Lopez, Charles**. *Performance of the Southern California Edison Company Stirling Dish*. 1993.
53. **Stirling Energy Systems**. Stirling Energy Systems and Tessera Solar Introduce Optimized SunCatcher Solar Power System. [En línea] 23 de Junio de 2009. <http://www.stirlingenergy.com/pdf/2009-06-23.pdf>.
54. **Richter, Christoph, Teske, Sven y Short, Rebecca**. *Concentrating Solar Power Global Outlook 2009 - Why renewable energy is hot*. s.l. : GreenPeace International, SolarPACES, ESTELA, 2009.
55. Nickel Institute. *Multimedia Magazine*. [En línea] http://www.nickelinstitute.org/multimedia/magazine/2008/December_2008/Solar/solar1-650.jpg.

56. **Sun Lab.** Solar Power Tower. [En línea]
http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/PDFs/solar_tower.pdf.

57. —. Solar Parabolic Trough. [En línea]
http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/PDFs/solar_trough.pdf.

58. **ESTELA- European Solar Thermal Electricity Assciation.** Progress and Opportunities with CSP for Europe. [En línea] 19 de Noviembre de 2008. www.estelasolar.eu.

59. **Sustainable Energy Science and Engineering Center.** Florida State University-Solar Thermal Conversion. [En línea]
<http://esc.fsu.edu/documents/lectures/ECS2006/SolarThermal.pdf>.

60. *Geothermal electricity production by means of the low temperature differential Stirling Engine.* **Kolin, Ivo.** Kyushu-Tohoku, Japón : s.n., 2000. Proceedings World Geothermal Congress.

61. **American Stirling Company.** Stirling Engine Reference - Guide and Catalog. [En línea]
www.stirlingengine.com.

62. Ivo Kolin - Stirling Motor. [En línea] www.ivokolin.com.

63. **Palma, Rodrigo, y otros.** *Geotermia y motor Stirling: Caminando hacia la libertad.* Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2008. Taller de Proyecto. Informe Final. https://www.ucursos.cl/ingenieria/2008/1/EI2A1/7/material_alumnos/objeto/17465.

64. Stirling Engines of Saitama University. [En línea]
<http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/kiriki/home.html>.

65. *Comparison of low-and high-temperature differential Stirling engines.* . **I, Iwamoto, y otros.** 1997. Proceedings of eighth International Stirling engine conference. págs. 29-38.

66. **Zumerchik, John, [ed.]**. *Macmillan Encyclopedia of Energy*. New York : Macmillan Reference USA, 2001.

67. **Greenpeace International, European Renewable Energy Council (EREC)**. *Energy Revolution. A sustainable Global Energy Outlook*. 2008.

68. *Electrical power generation from heat engines*. **Smith, G.A. Barnes, S.A.** Londres : s.n., 1997, Power Electronics for Renewable Energy (Digest No: 1997/170), IEE Colloquium on , págs. 5/1 - 5/6.

69. *Comparison of conceptual designs for 25 kWe advanced Stirling conversion systems for dish electric applications*. **Shaltens, Richard y Schreiber, Jeffrey**. Washington D.C. : s.n., 1989. Energy Conversion Engineering Conference, 1989. IECEC-89. Proceedings of the 24th Intersociety . págs. 2305 - 2315 vol.5.

70. *Development of solar and micro co-generation power installations on the basis of Stirling engines*. **Makhkamov, K., y otros**. Las Vegas : s.n., 2000. Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000. (IECEC) 35th Intersociety. págs. 723 - 733 vol.2.

71. **Sustainable Energy Science and Engineering Center**. Florida State University. *Concentrating Collectors*. [En línea] <http://esc.fsu.edu/documents/lectures/ECS2006/ConcentratingCollector.pdf>.

72. —. Florida State University. *Thermodynamics Fundamentals for Energy Conversion Systems - Renewable Energy Applications*. [En línea] <http://esc.fsu.edu/documents/lectures/ECS2005/Thermodynamics.pdf>.

73. —. Florida State University. *Economic Solar Thermal for Rural Development*. [En línea] <http://esc.fsu.edu/documents/lectures/SolarThermal.pdf>.

74. —. Florida State University. *Geothermal Energy - Sustainable Energy Sources*. [En línea] <http://esc.fsu.edu/documents/lectures/ECS2005/Geothermal.pdf>.

75. —. Florida State University. *Sustainable Energy Conversion Systems*. [En línea] <http://esc.fsu.edu/documents/lectures/ECS2006/Intro.pdf>.
76. **PhysicalGeografy.net** . Fundamentals eBOOK - Chapter 6: Energy and Matter - (i). Earth-Sun Relationships and Insolation. [En línea] <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/6i.html>.
77. **PhysicalGeografy.net**. Fundamentals eBOOK - Chapter 6: Energy and Matter - (g). Solar Source of Earth's Energy. [En línea] <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/6g.html>.
78. —. Fundamentals eBOOK - Chapter 6: Energy and Matter - (e). Laws of Thermodynamics. [En línea] <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/6e.html>.
79. **Johansson, Thomas B., Burnham, Laurie y Reddy, Amula, [ed.]**. *Renewable energy : sources for fuels and electricity*. Washington D.C. : Island Press, 1993.
80. Wikipedia. *Motor Striling*. [En línea] http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_Engine.
81. Plataforma Solar de Almería. [En línea] <http://www.psa.es/webesp/index.html> .
82. **Laplante, Philip A., [ed.]**. *Comprehensive Dictionary of Electrical Engineering*. Boca Raton : CRC Press, 2005.
83. **Fernandez Díez, Pedro**. *Termodinámica Técnica*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.
84. **Rodríguez, Jorge A**. *Introducción a la Termodinámica con Algunas Aplicaciones de Ingeniería*. Universidad Tecnológica Nacional - Argentina.
85. CREG. *Tarifas Energía*. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2009.] http://www.creg.gov.co/html/i_portals/index.php?p_origin=internal&p_name=content&p_id=MI-236&p_options=.

ANEXO 1. COMPARACIÓN DE COSTOS DEL SISTEMA DISCO-STIRLING CON OTRAS ENERGÍAS RENOVABLES A NIVEL GLOBAL

Tabla 26. Costos de Inversión, Operación y Mantenimiento para Energías Renovables. Tomado de: (67)

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
Fotovoltaica						
Capacidad Global Instalada [GW]	5,2	21	269	921	1799	2911
Costos de Inversión [\$/kW]	6600	3760	1660	1280	1140	1080
Costos Operación y Mantenimiento [\$/kW]	66	38	16	13	11	10
Solar Térmica (Las tres tecnologías)						
Capacidad Global Instalada [GW]	0,53	5	83	199	468	801
Costos de Inversión [\$/kW]	7530	6340	5240	4430	4360	4320
Costos Operación y Mantenimiento [\$/kW]	300	250	210	180	160	155
Eólica (En tierra)						
Capacidad Global Instalada [GW]	59	162	866	1508	1887	2186
Costos de Inversión [\$/kW]	1510	1370	1180	1110	1090	1090
Costos Operación y Mantenimiento [\$/kW]	58	51	45	43	41	41
Eólica (Fuera de la costa)						
Capacidad Global Instalada [GW]	0,3	1,6	27	114	333	547
Costos de Inversión [\$/kW]	3760	3480	2600	2200	1990	1890
Costos Operación y Mantenimiento [\$/kW]	166	153	114	97	88	83
Biomasa (Generación de Electricidad)						
Capacidad Global Instalada [GW]	21	35	56	65	81	99
Costos de Inversión [\$/kW]	3040	2750	2530	2470	2440	2415
Costos Operación y Mantenimiento [\$/kW]	183	166	152	148	147	146
Biomasa (Combinación de Calor y Potencia)						
Capacidad Global Instalada [GW]	32	60	177	275	411	521
Costos de Inversión [\$/kW]	5770	4970	3860	3380	3110	2950
Costos Operación y Mantenimiento [\$/kW]	404	348	271	236	218	207
Geotérmica (Generación Convencional)						

ANEXO 1. COMPARACIÓN DE COSTOS DEL SISTEMA DISCO-STIRLING CON OTRAS ENERGÍAS RENOVABLES A NIVEL GLOBAL

Capacidad Global Instalada [GW]	8,7	12	33	71	120	152
Costos de Inversión [\$/kW]	17440	15040	11560	10150	9490	8980
Costos Operación y Mantenimiento [\$/kW]	645	557	428	375	351	332
Energía de las Mareas y Olas						
Capacidad Global Instalada [GW]	0,27	0,9	17	44	98	194
Costos de Inversión [\$/kW]	9040	5170	2910	2240	1870	1670
Costos Operación y Mantenimiento [\$/kW]	360	207	117	89	75	66

*Nota: La tabla esta en US\$ de 2 005.