



**ESCUELA DE INGENIERIA Y
ARQUITECTURA**
UNIVERSIDAD ZARAGOZA



PROYECTO FIN DE CARRERA

MEMORIA

ANALISIS Y ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE Disco Stirling

Alumno: Alejandro Inogés Blasco

Directora: Yolanda Bravo Rodríguez

Especialidad: Ingeniería Técnica Industrial Mecánica

Convocatoria: Septiembre 2011

Indice

| | |
|---|-----|
| 1.- OBJETIVOS / MOTIVACION / ALCANCE..... | 1 |
| 1. 1- Objetivos del proyecto | 1 |
| 1. 2.- Motivación | 2 |
| 1. 3.- Alcance | 3 |
| 2.- INTRODUCCION | 4 |
| 3.- MOTOR STIRLING | 5 |
| 3. 1.- Características generales del motor Stirling | 5 |
| 3. 1. 1.- Historia..... | 5 |
| 3. 1. 2.- Evolución | 6 |
| 3. 1. 3.- Funcionamiento..... | 9 |
| 3. 1. 4.- Componentes..... | 12 |
| 3. 1. 5.- Regenerador | 14 |
| 3. 1. 6.- Características: ventajas e inconvenientes | 16 |
| 3. 1. 7.- Rendimiento | 19 |
| 4.- TECNOLOGIA DE DISCO STIRLING | 22 |
| 4. 1.- Descripción y análisis de los sistemas disco Stirling..... | 22 |
| 4. 1. 1.- Introducción | 22 |
| 4. 1. 2.- Historia de los sistemas disco Stirling | 24 |
| 4. 1. 3.- Componentes del sistema..... | 28 |
| 4. 1. 4.- Plataformas de concentración de dispositivos disco Stirling | 37 |
| 4. 2.- Listado de empresas en desarrollo y producción de la tecnología..... | 45 |
| 4. 2. 1.- Stirling Energy Systems, Inc (SES) | 46 |
| 4. 2. 2.- Renovalia Energy | 49 |
| 4. 2. 3.- InfiniaCorp | 53 |
| 4. 2. 4.- Innova Technology Solutions SpA | 57 |
| 4. 3.- Viabilidad técnica | 61 |
| 5.- REVISION GENERAL DE LA ENERGIA SOLAR | 64 |
| 5. 1.- Energía fotovoltaica vs energía solar térmica..... | 64 |
| 5. 1. 1.- Energía fotovoltaica | 64 |
| 5. 1. 2.- Energía solar térmica | 89 |
| 5. 1. 3.- Comparativa | 100 |

| | |
|---|-----|
| 5. 2.- Centrales de torre | 102 |
| 5. 2. 1.- Elementos constituyentes | 103 |
| 5. 2. 2.- Funcionamiento..... | 106 |
| 5. 2. 3.- Tipos de receptores | 107 |
| 5. 2. 4.- Disposición del campo de heliostatos | 109 |
| 5. 2. 5.- Primeras plataformas con centrales de torre [48]..... | 112 |
| 5. 2. 6.- Plataformas con centrales de torre en la actualidad | 115 |
| 5. 3.- Cilindros parabólicos | 126 |
| 5. 3. 1.- Elementos constituyentes | 127 |
| 5. 3. 2.- Funcionamiento..... | 131 |
| 5. 3. 3.- Esquemas de instalación | 131 |
| 5. 3. 4.- Presencia mundial de centrales de cilindros parabólicos | 136 |
| 5. 3. 5.- Centrales de cilindros parabólicos en España | 141 |
| 6.- VALORES ORIENTATIVOS DE EFICIENCIA | 147 |
| 7.- FUTUROS DESARROLLOS | 152 |
| 7. 1.- Cogeneración: potencial de aprovechamiento con biomasa | 152 |
| 7. 1. 1.- Introducción | 152 |
| 7. 1. 2.- Tecnología en sistemas disco Stirling..... | 155 |
| 7. 2.- Almacenamiento térmico: propuestas de sistemas | 156 |
| 7. 2. 1.- Introducción | 156 |
| 7. 2. 2.- Materiales de cambio de fase | 157 |
| 7. 2. 3.- Almacenamiento térmico en dispositivos de disco Stirling..... | 158 |
| 7. 3.- Hibridación de los sistemas disco Stirling..... | 163 |
| 7. 3. 1.- Introducción | 163 |
| 7. 3. 2.- Hibridación aplicada a los dispositivos disco Stirling | 164 |
| 8.- CONCLUSIONES | 173 |

Referencias

- [1] Laboratorios Philips de Holanda., destinados a criogenia. En 1990 se independizan dando lugar a Stirling Cryogenics & Refrigeration BV.
- [2] Kockums, productor de tecnología marina. www.kockums.se.
- [3] Portaaviones de la armada japonesa.
- [4] Stirling Cryogenics & Refrigeration BV. <http://www.stirlingcryogenics.com/>
- [5] Global Cooling. http://stirlingultracold.com/global_cooling
- [6] Twinbird Corporation. <http://fpsc.twinbird.jp/en/index.html>
- [7] PennState.
- [8] Polo - Tech. <http://www.polo-tech.com/>
- [9] Vehículos híbridos serie con motor Stirling
http://paisa_maca0.tripod.com/paginas2/inf.varia7.htm
- [10] Microgen Engine Corporation. <http://www.microgen-engine.com/>
- [11] Baxi Ecogen. <http://www.baxi.co.uk/ecogen>
- [12] E. On. <http://www.eon-espana.com>
- [13] WhisperGen. www.whispergen.com
- [14] Páginas de internet con referencias a empresas productoras de motores Stirling:
<http://www.sesusa.org/stirlng2.htm>,
<http://waoline.com/science/NewEnergy/Motors/StirlingCie.htm>
- [15] Innova Technology Solutions. Empresa productora de sistemas disco Stirling.
<http://www.innova.co.it/>
- [16] Vaillant. Empresa española de climatización. <http://www.vaillant.es>
- [17] Creator Navien. Empresa coreana de climatización. <http://en.kdnavien.com>
- [18] Viessmann. Empresa alemana de climatización. <http://www.viessmann.es/>
- [19] BDR Thermea. Empresa con sede en los Países Bajos y distribuidora de sistemas de calefacción. <http://www.bdrthermea.com>
- [20] InfiniaCorp. <http://www.infiniacorp.com/>
- [21] SunPower. Empresa estadounidense productora de motores Stirling.
<http://www.sunpower.com/>
- [22] CryoTel. Empresa colaboradora con SunPower destinada a la producción y distribución de enfriadores. <http://www.sunpower.com/>
- [23] Stirling Biopower, Inc. Empresa estadounidense productora de motores Stirling.
<http://www.stirlingbiopower.com>
- [24] Stirling Technolgy Inc. Empresa estadounidense productora de motores Stirling.
<http://www.stirling-tech.com/>
- [25] Meridian Energy. Empresa neozelandesa generadora de energía eléctrica.
<http://www.meridianenergy.co.nz/>
- [26] Efficient Home Energy, SL. <http://www.ehe.eu>
- [27] Datos obtenidos de:
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia31/HTML/articulo02.htm>
- [28] Datos obtenidos de:
http://www.miliarium.com/monografias/energia/E_Renovables/Fotovoltaica.htm
- [29] Datos obtenidos de: http://www.energia-solar-fotovoltaica.info/4_Paneles_Fotovoltaicos/8_Tipos_de_Paneles_Fotovoltaicos.html

- [30] Datos obtenidos de: <http://www.blogenergiasrenovables.com/tipos-de-paneles-solares>
- [31] Datos obtenidos de: <http://comparativatech.com/comparativa-celulas-fotovoltaicas-comerciales-paneles-fotovoltaicos-y-placas-solares/2010/03/> y <http://blog.habitissimo.es/2009/04/25/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/> y http://www.energia-solar-fotovoltaica.info/4_Paneles_Fotovoltaicos/8_Tipos_de_Paneles_Fotovoltaicos.html
- [32] Datos obtenidos de:
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia40/HTML/articulo05.htm>
- [33] Datos obtenidos de: <http://www.slideshare.net/robvaler/el-mercado-de-las-aplicaciones-fotovoltaicas-conectadas-a-la-red-en-espana>
- [34] Datos obtenidos de:
http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica
- [35] Shell Solar y Geosol construirán una gran central eléctrica en Alemania.
http://www.energias-renovables.com/energias/renovables/index/pag/fotovoltaica/collection/right/fotovoltaica_tip/articulo/pagant/fotovoltaica/pagid/2281/botid/21/title/Shell%20Solar%20y%20Geosol%20construir%C3%A1n%20una%20gran%20central%20el%C3%A9ctrica%20solar%20en%20Alemania
- [36] SAG Solarstrom. Especializada en el desarrollo de productos relacionados con la tecnología fotovoltaica. <http://www.solarstromag.net/>
- [37] General Motors. <http://www.gm.com/>
- [38] Veolia Environnement. <http://www.veolia.com/en/>
- [39] Clairvoyant Energy. <http://www.clairvoyant-energy.com/>
- [40] RWE Schott.
<http://www.schott.com/photovoltaic/english/index.html?so=iberica&lang=spanish>
- [41] Asif. <http://asif.org/>
- [42] ISFOC. Instituto de Sistemas Solares Fotovoltaicos de Concentración.
<http://www.isfoc.es/>
- [43] AIE. Agencia Internacional de la Energía. <http://www.iea.org/>
- [44] Datos obtenidos de:
http://www.miliarium.com/monografias/energia/E_Renovables/Solar_termica.htm
- [45] Datos obtenidos de: <http://energiadoblecero.com/energias-renovables/energia-solar-termoelectrica/centrales-termoelectricas-de-torre>
- [46] Datos obtenidos de: <http://www.textoscientificos.com/energia/solar/torre>
- [47] Datos obtenidos de: <http://www.solarweb.net/forosolar/solar-termoelectrica/9664-central-torre-central.html>
- [48] Datos obtenidos de: http://es.wikipedia.org/wiki/Central térmica_solar
- [49] Spilling Energy Sistem. Empresa productora de motores varios.
<http://www.spilling.de/english/index.php>
- [50] Abengoa Solar. <http://www.abengoa-solar.com/>
- [51] Datos obtenidos de: <http://es.wikipedia.org/wiki/PS10>
- [52] Datos obtenidos de: <http://es.wikipedia.org/wiki/PS20>
- [53] CIEMAT. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. <http://www.ciemat.es/>
- [54] Abener. <http://www.abener.es/>
- [55] Plataforma Solar de Almería, PSA.
<http://www.psa.es/webesp/installaciones/receptor.php>
- [56] SENER. <http://www.sener.es>
- [57] Martin – Marietta. <http://www.martinmarietta.com/>

- [58] Torresol Energy. <http://www.psa.es/webesp/installaciones/receptor.php>
- [59] Datos obtenidos de: <http://www.solarmillennium.de/upload/pdf/Andasol1-3spanisch.pdf>
- [60] Generación de Sistemas de Energía Solar, SEGS.
http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems
- [61] Blythe. <http://www.renewablesverdes.com/tag/proyecto-de-energia-solar-blythe/>
- [62] Solar Millenium. <http://www.solarmillennium.de>
- [63] Chevron. <http://www.chevron.com/>
- [64] Datos obtenidos de: <http://es.wikipedia.org/wiki/Andasol>
- [65] Cobra Energía.
<http://www.renewablesmadeinspain.es/ficha/pagid/88/letra/C/titulo/Cobra%20Energ%C3%A9tica/>
- [66] Grupo ACS. <http://www.grupoacs.com/>
- [67] Proyecto Extresol. <http://www.rankingsolar.com/component/content/article/856-parque-termosolar-extresol-1.html?paginacion=cptags&tagId=100>
- [68] Proyecto Manchasol. <http://www.rankingsolar.com/parques-solares/34-parques-solares/855-parque-termosolar-manchasol-1.html>
- [69] Arizona public service. APS.
http://en.wikipedia.org/wiki/Arizona_Public_Service
- [70] Corporaciones de la Comisión de Arizona. ACC.
http://www.abengoasolar.com/corp/web/es/acerca_de_nosotros/sala_de_prensa/noticias/2008/20081218_noticia.html
- [71] United Stirling AB. www.wikipatents.com/as/s_assignee/United+Stirling+AB
- [72] Advanco Corporation. <http://www.manta.com/c/mmfdwk5/advanco-corporation>
- [73] McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA).
<http://www.aviationearth.com/mcdonnell-douglas/>
- [74] Stirling Energy Systems, SES. <http://www.stirlingenergy.com/>
- [75] Solar Kinetics. <http://www.solarkinetics.co.uk/>
- [76] SAIC. <http://www.saic.com/>
- [77] Steinmüller. http://www.steinmueller-engineering.com/contenido/cms/front_content.php?idcat=41
- [78] SBP. <http://www.sbp.de>
- [79] SOLO Kleinmotoren.
<http://www.stirlingengines.org.uk/manufact/manf/germany/new7.html>
- [80] EuroDISH. <http://www.psa.es/webesp/installaciones/discos.php>
- [81] Inabensa. <http://www.inabensa.com/>
- [82] EnviroDISH.
http://www.ciemat.es/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/46039345_211200911841.pdf
- [83] Energy Research Centre. <http://www.erc.uct.ac.za/>
- [84] Solar Systems. <http://solarsystems.com.au/>
- [85] Laboratorios Sandia (SNL). <http://www.sandia.gov/>
- [86] Maricopa Solar. http://www.stirlingenergy.com/pdf/2009_8_19.pdf
- [87] Tessera Solar. <http://www.tesserasolar.com/>
- [88] NTR. www.ntrplc.com
- [89] Calico Solar. <http://www.energy.ca.gov/sitingcases/calicosolar/index.html>
- [90] Distal – I, Distal – II Y EuroDISH.
<http://www.psa.es/webesp/installaciones/discos.php>
- [91] Green Plains. <http://www.gpreinc.com/>
- [92] Wind Capital Group. <http://www.windcapitalgroup.com/Home.aspx>

- [93] Renovalia Energy. <http://www.renovalia.com/>
- [94] Grupo Forlasa. <http://www.forlasa.es/>
- [95] Lactalis. <http://www.lactalis.es/>
- [96] Casa del Angel Termosolar. <http://www.efikosnews.com/esolar/1399.html>
- [97] Rioglass. <http://www.rioglassolar.com>
- [98] Iberdrola Renovables. <http://www.iberdrolarenovables.es>
- [99] Gamesa. <http://www.gamesa.es>
- [100] GLG Partners. www.glgpartners.com
- [101] Idealab. <http://www.idealab.com/>
- [102] Power Play Energy. <http://powerplayenergy.net/>
- [103] Innova Technolgy Solutions SpA. <http://www.innova.co.it/>
- [104] Entrevista a Francesco Guidetti, director ejecutivo de Innova. CSP Today. <http://es.csptoday.com/qa/la-solucion-de-disco-stirling-de-innova-esta-en-la-lista-para-su-distribucion-en-italia>
- [105] Gráficas evolución de la cogeneración en España. <http://electronikorobin.blogspot.com/2009/05/cogeneracion-en-espana.html>
- [106] Datos almacenamiento térmico. <http://es.csptoday.com/weekly-brief/almacenamiento-termico-csp-analizando-las-opciones>
- [107] Solar Reserve. <http://www.solarreserve.com/>
- [108] United Technologies Corporation. http://es.wikipedia.org/wiki/United_Technologies_Corporation
- [109] SunLab. <http://www.sunlab.com/>
- [110] National Renewable Energy Laboratory. <http://www.nrel.gov/>
- [111] Dispositivo de almacenamiento desarrollado por Infinia. . Qiu, S., M. Blanco, D. Yarger, R. Galbraith, 2010. "La energía térmica del dispositivo de almacenamiento". Patente WO2010006319 Mundial.
- [112] Ed. Zublin. <http://www.zublin.com.cn>
- [113] HelioDynamics. <http://www.hdsolar.com/>
- [114] Solgate. <http://www.ual.es/Universidad/GabPrensa/index/2005/mayo/26-05-05/andaluciainvestiga.pdf>
- [115] SolHyCo. <http://www.psa.es/webesp/areas/cilindroparabolica/solhyco.php>
- [116] STM Sundish Sistema. <http://www.solarpaces.org/Library/AnnualReports/docs/ATR2002.pdf>
http://www.sener.gob.mx/webSener/res/168/A6_Solar2.pdf
- [117] Biodish. Manzini T., P. Heller, Butler B., B. Osborn, Schiel W. Goldberg V., R. Buck, Diver R., Andraka C., J. Moreno, "Sistemas de Dish-Stirling: Una Visión General del Desarrollo y el Estado ". Diario de Ingeniería de la Energía Solar, Volumen 125, Número 2, 135, 2003.
- [118] Hypire. Laing, Reusch M., "sodio híbrido calor receptor de la pipa para plato de sistemas de Stirling - Resultados en el diseño y la prueba", de 2001. D. Laing, Palsson M., "plato híbrido / Stirling Sistemas: combustor y la pipa de calor del receptor para el Desarrollo". Diario de Ingeniería de la Energía Solar, 2002.
- [119] Proyecto llevado a cabo por Sandia. Moreno, J., Rawlinson, K., Andraka, C., Mehos, M., Bohn, M., Corey, J., "Dish / Stirling pruebas receptor híbrido sub-escala y el diseño a gran escala". Actas de la Conferencia Intersociety Energía 34a Ingeniería de Conversión de 1999.
- [120] Proyecto Colón – Solar. http://usuarios.multimania.es/arquininstal03/publicaciones/otras/bib584_receptorsolar_integrado_con_caldera.pdf

- [121] Abantia. <http://www.abantia.com/>
- [122] Comsa Emte. <http://www.comsaemte.com>
- [123] Centro Tecnológico Avanzado de Energías Renovables. CTAER.
<http://www.ctaer.com/>
- [124] Solarlite. <http://www.solarlite.de>
- [125] Sialsol. <http://www.sialsol.es>
- [126] Planta Abantia y Comsa Emte en Cataluña.
http://www.evwind.com/noticias.php?id_not=8728
<http://aragonbiomasa.blogspot.com/2011/04/la-hibridacion-biomasa-termosolar.html>
<http://www.energiza.org/elCTAERSol-biomasa.html>
- [127] Red Eléctrica de España. REE. <http://www.ree.es>
- [128] Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC). <http://www.ctfc.cat/>
- [129] Planta hibridada con biomasa desarrollada por Solarlite y Sialsol.
<http://infobio.ctfc.cat/?p=2850&lang=es>
- [130] Lignocrop.
<http://www.energiza.org/iberdrolarenovablescultivosenerg% E9ticos.html>
- [131] Centro de Investigación Forestal (INIA-CIFOR).
<http://wwwsp.inia.es/Investigacion/centros/CIFOR/Paginas/cifor.aspx>
- [132] Instituto Valenciano de Investigación Agraria (IVIA). <http://www.ivia.es/>
- [133] Ingelia.
<http://www.energiza.org/Ingeliadesarrollalaprimeraplantadecarbonizacionhidrotermal.html>
- [134] Instituto de Tecnología Química (ITQ). <http://itq.webs.upv.es/>
- [135] Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI). <http://www.cdti.es/>
- [136] Empresa Nacional de Innovación, S.A., (ENISA). <http://www.enisa.es/>
- [137] Planta híbrida Sol - Gas en Florida.
<http://www.diariolasamericas.com/noticia/67317/en-la-florida-la-primeraplantasolariabrida-del-mundo>
- [138] Planta híbridas Sol – Gas en Marruecos.
<http://canarias24horas.com/index.php/2009102668238/internacional/abengoa-construye-en-marruecos-la-planta-de-ciclo-combinado-mas-potente-del-mundo.html>
- [139] Planta híbrida Sol – Gas en Hassi-R'mel en Argelia.
http://www.abengoasolar.com/corp/web/es/nuestras_plantas/plantas_en_operacion/argelia/
- [140] New Energy Algeria (NEAL). <http://www.neal-dz.net/>
- [141] Agua Prieta II. Planta híbrida Sol – Gas en Mexico. <http://www.energias-renovables.com/energias/renovables/index/pag/termoelectrica/botid/23/colright/termoeléctrica/tip/articulo/title/Ir% 20a% 20Solar/pagid/15824/title/Abengoa% 20desarrollar%C3%A1% 20una% 20planta% 20h%C3%ADbrida% 20solar-gas% 20en% 20M%C3%A9xico/>
- [142] Planta híbrida Sol – Gas en Egipto.
<http://www.protermosolar.com/boletines/37/d08.html>
- [143] New Renewable Energy Authority (NREA). <http://www.nrea.gov.eg>
- [144] Solar One. <http://www.energy.ca.gov/sitingcases/calicosolar/index.html>
- [145] Solar Two. <http://www.energy.ca.gov/sitingcases/solartwo/index.html>
- [58] Martin Marietta. <http://www.martinmarietta.com/>
- [59] Torresol Energy. <http://www.psa.es/webesp/installaciones/receptor.php>
- [59] Datos obtenidos de: <http://www.solarmillennium.de/upload/pdf/Andasol1-3spanisch.pdf>

- [60] Generación de Sistemas de Energía Solar, SEGS.
http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems
- [61] Blythe. <http://www.renewablesverdes.com/tag/proyecto-de-energia-solar-blythe/>
- [62] Solar Millenium. <http://www.solarmillennium.de>
- [63] Chevron. <http://www.chevron.com/>
- [64] Datos obtenidos de: <http://es.wikipedia.org/wiki/Andasol>
- [65] Cobra Energía.
<http://www.renewablesmadeinspain.es/ficha/pagid/88/letra/C/titulo/Cobra%20Energ%C3%A1A/>
- [66] Grupo ACS. <http://www.grupoacs.com/>
- [67] Proyecto Extresol. <http://www.rankingsolar.com/component/content/article/856-parque-termosolar-extresol-1.html?paginacion=cptags&tagId=100>
- [68] Proyecto Manchasol. <http://www.rankingsolar.com/parques-solares/34-parques-solares/855-parque-termosolar-manchasol-1.html>
- [69] Arizona public service. APS.
http://en.wikipedia.org/wiki/Arizona_Public_Service
- [70] Corporaciones de la Comisión de Arizona. ACC.
http://www.abengoasolar.com/corp/web/es/acerca_de_nosotros/sala_de_prensa/noticias/2008/20081218_noticia.html
- [71] United Stirling AB. www.wikipatents.com/as/s_assignee/United+Stirling+AB
- [72] Advanco Corporation. <http://www.manta.com/c/mmfwdw5/advanco-corporation>
- [73] McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA).
<http://www.aviationearth.com/mcdonnell-douglas/>
- [74] Stirling Energy Systems, SES. <http://www.stirlingenergy.com/>
- [75] Solar Kinetics. <http://www.solarkinetics.co.uk/>
- [76] SAIC. <http://www.saic.com/>
- [77] Steinmüller. http://www.steinmueller-engineering.com/contenido/cms/front_content.php?idcat=41
- [78] SBP. <http://www.sbp.de>
- [79] SOLO Kleinmotoren.
<http://www.stirlingengines.org.uk/manufact/manf/germany/new7.html>
- [80] EuroDISH. <http://www.psa.es/webesp/installaciones/discos.php>
- [81] Inabensa. <http://www.inabensa.com/>
- [82] EnviroDISH.
http://www.ciemat.es/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/46039345_211200911841.pdf
- [83] Energy Research Centre. <http://www.erc.uct.ac.za/>
- [84] Solar Systems. <http://solarsystems.com.au/>
- [85] Laboratorios Sandia (SNL). <http://www.sandia.gov/>
- [86] Maricopa Solar. http://www.stirlingenergy.com/pdf/2009_8_19.pdf
- [87] Tessera Solar. <http://www.tesserasolar.com/>
- [88] NTR. www.ntrplc.com
- [89] Calico Solar. <http://www.energy.ca.gov/sitingcases/calicosolar/index.html>
- [90] Distal – I, Distal – II Y EuroDISH.
<http://www.psa.es/webesp/installaciones/discos.php>
- [91] Green Plains. <http://www.gpreinc.com/>
- [92] Wind Capital Group. <http://www.windcapitalgroup.com/Home.aspx>
- [93] Renovalia Energy. <http://www.renovalia.com/>
- [94] Grupo Forlasa. <http://www.forlasa.es/>
- [95] Lactalis. <http://www.lactalis.es/>

- [96] Casa del Angel Termosolar. <http://www.efikosnews.com/esolar/1399.html>
- [97] Rioglass. <http://www.rioglassolar.com>
- [98] Iberdrola Renovables. <http://www.iberdrolarenovables.es>
- [99] Gamesa. <http://www.gamesa.es>
- [100] GLG Partners. www.glgpartners.com
- [101] Idealab. <http://www.idealab.com/>
- [102] Power Play Energy. <http://powerplayenergy.net/>
- [103] Innova Technolgy Solutions SpA. <http://www.innova.co.it/>
- [104] Entrevista a Francesco Guidetti, director ejecutivo de Innova. CSP Today. <http://es.csptoday.com/qa/la-soluci%C3%B3n-de-disco-stirling-de-innova-est%C3%A1-lista-para-su-distribuci%C3%B3n-en-italia>
- [105] Gráficas evolución de la cogeneración en España. <http://electronikorobin.blogspot.com/2009/05/cogeneracion-en-espana.html>
- [106] Datos almacenamiento térmico. <http://es.csptoday.com/weekly-brief/almacenamiento-t%C3%A9rmico-csp-analizando-las-opciones>
- [107] Solar Reserve. <http://www.solarreserve.com/>
- [108] United Technologies Corporation. http://es.wikipedia.org/wiki/United_Technologies_Corporation
- [109] SunLab. <http://www.sunlab.com/>
- [110] National Renewable Energy Laboratory. <http://www.nrel.gov/>
- [111] Dispositivo de almacenamiento desarrollado por Infinia. . Qiu, S., M. Blanco, D. Yarger, R. Galbraith, 2010. "La energía térmica del dispositivo de almacenamiento". Patente WO2010006319 Mundial.
- [112] Ed. Zublin. <http://www.zublin.com.cn>
- [113] HelioDynamics. <http://www.hdsolar.com/>
- [114] Solgate. <http://www.ual.es/Universidad/GabPrensa/index/2005/mayo/26-05-05/andaluciainvestiga.pdf>
- [115] SolHyCo. <http://www.psa.es/webesp/areas/cilindroparabolica/solhyco.php>
- [116] STM Sundish Sistema. <http://www.solarpaces.org/Library/AnnualReports/docs/ATR2002.pdf>
http://www.sener.gob.mx/webSener/res/168/A6_Solar2.pdf
- [117] Biodish. Manzini T., P. Heller, Butler B., B. Osborn, Schiel W. Goldberg V., R. Buck, Diver R., Andraka C., J. Moreno, "Sistemas de Dish-Stirling: Una Visión General del Desarrollo y el Estado ". Diario de Ingeniería de la Energía Solar, Volumen 125, Número 2, 135, 2003.
- [118] Hypire. Laing, Reusch M., "sodio híbrido calor receptor de la pipa para plato de sistemas de Stirling - Resultados en el diseño y la prueba", de 2001. D. Laing, Palsson M., "plato híbrido / Stirling Sistemas: combustor y la pipa de calor del receptor para el Desarrollo". Diario de Ingeniería de la Energía Solar, 2002.
- [119] Proyecto llevado a cabo por Sandia. Moreno, J., Rawlinson, K., Andraka, C., Mehos, M., Bohn, M., Corey, J., "Dish / Stirling pruebas receptor híbrido sub-escala y el diseño a gran escala". Actas de la Conferencia Intersociety Energía 34a Ingeniería de Conversión de 1999.
- [120] Proyecto Colón – Solar. http://usuarios.multimania.es/arquinstal03/publicaciones/otras/bib584_receptorsolar_integrado_con_caldera.pdf
- [121] Abantia. <http://www.abantia.com/>
- [122] Comsa Emte. <http://www.comsaemte.com>
- [123] Centro Tecnológico Avanzado de Energías Renovables. CTAER. <http://www.ctaer.com/>

- [124] Solarlite. <http://www.solarlite.de>
- [125] Sialsol. <http://www.sialsol.es>
- [126] Planta Abantia y Comsa Emte en Cataluña.
http://www.evwind.com/noticias.php?id_not=8728
<http://aragonbiomasa.blogspot.com/2011/04/la-hibridacion-biomasa-termosolar.html>
<http://www.energiza.org/elICTAERsol-biomasa.html>
- [127] Red Eléctrica de España. REE. <http://www.ree.es>
- [128] Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC). <http://www.ctfc.cat/>
- [129] Planta hibridada con biomasa desarrollada por Solarlite y Sialsol.
<http://infobio.ctfc.cat/?p=2850&lang=es>
- [130] Lignocrop.
<http://www.energiza.org/iberdrolarenovables cultivos energ% E9ticos.html>
- [131] Centro de Investigación Forestal (INIA-CIFOR).
<http://wwwsp.inia.es/Investigacion/centros/CIFOR/Paginas/cifor.aspx>
- [132] Instituto Valenciano de Investigación Agraria (IVIA). <http://www.ivia.es/>
- [133] Ingelia.
<http://www.energiza.org/Ingeliadesarrollalaprimeraplantadecarbonizacionhidrotermal.html>
- [134] Instituto de Tecnología Química (ITQ). <http://itq.webs.upv.es/>
- [135] Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI). <http://www.cdti.es/>
- [136] Empresa Nacional de Innovación, S.A., (ENISA). <http://www.enisa.es/>
- [137] Planta híbrida Sol - Gas en Florida.
<http://www.diariolasamericas.com/noticia/67317/en-la-florida-la-primeraplanta-solar-hibrida-del-mundo>
- [138] Planta híbridas Sol – Gas en Marruecos.
<http://canarias24horas.com/index.php/2009102668238/internacional/abengoa-construye-en-marruecos-la-planta-de-ciclo-combinado-mas-potente-del-mundo.html>
- [139] Planta híbrida Sol – Gas en Hassi-R'mel en Argelia.
http://www.abengoasolar.com/corp/web/es/nuestras_plantas/plantas_en_operacion/argelia/
- [140] New Energy Algeria (NEAL). <http://www.neal-dz.net/>
- [141] Agua Prieta II. Planta híbrida Sol – Gas en Mexico. <http://www.energias-renovables.com/energias/renovables/index/pag/termoelectrica/botid/23/colright/termoel ectrica/tip/articulo/title/Ir% 20a% 20Solar/pagid/15824/title/Abengoa% 20desarrollar%C 3%A1% 20una% 20planta% 20h%C3%ADbrida% 20solar- gas% 20en% 20M%C3%A9xico/>
- [142] Planta híbrida Sol – Gas en Egipto.
<http://www.protermosolar.com/boletines/37/d08.html>
- [143] New Renewable Energy Authority (NREA). <http://www.nrea.gov.eg>

Bibliografía consultada

- <http://www.ecotec2000.de>
- <http://social.csptoday.com>
- <http://www.innova.co.it/en/index>
- <http://www.microgen-engine.com>
- <http://personales.able.es>
- <http://www.abengoa-solar.com>
- <http://www.todomotores.cl/motores-stirling.htm>
- <http://www.cch.unam.mx/ssaa/naturales/pdf/motor.pdf>
- <http://www.ecoticias.com>
- <http://www.renovetec.com>
- http://paisa_maca0.tripod.comf.varia7.htm
- <http://www.slideshare.net>
- <http://www.crest.org>
- <http://www.hev.doe.gov>
- <http://www.discoverthis.com>
- <http://www.alcion.es>
- <http://fuentesenergias.blogspot.com>
- <http://www.centralestmosolares.com>
- <http://mstirling.wordpress.com>
- <http://www.stirlingcryogenics.com>
- <http://www.sesusa.org>

- <http://www.cec.uchile.cl>
- <http://www.tdeploysla.es>
- <http://energiacasera.wordpress.com>
- <http://waoline.com>
- <http://www.energiasrenovables.ciemat.es>
- <http://www.miliarium.com>
- <http://www.solarweb.net>
- <http://www.monografias.com>
- <http://www.energiasolararagon.com>
- <http://www.cubasolar.cu>
- <http://www.energiasolartermica.biz>
- <http://www.miliarium.com>
- <http://www.solarweb.net>
- <http://www.ainyma.com>
- <http://erenovable.com>
- <http://www.solarweb.net>
- <http://energiadoblecero.com>
- <http://energelia.com>
- <http://www.torresolenergy.com>
- <http://www.madrimasd.org>
- <http://www.renovalia.com/energia-termosolar-electrica/>
- <http://e-ciencia.com>
- <http://aragonbiomasa.blogspot.com>
- <http://www.4alternatives.net>
- <http://www.energiza.org>

Listas de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Motor Stirling tipo Beta y diagrama P-V del ciclo termodinámico | 12 |
| Figura 2. Motor Stirling con regenerador..... | 15 |
| Figura 3. Dispositivos de disco Stirling | 22 |
| Figura 4. Esquema de la disposición de los elementos constituyentes en un dispositivo de disco Stirling | 28 |
| Figura 5. Concentrador solar con múltiples espejos..... | 30 |
| Figura 6. Receptor DIR. Sistema de SAIC / STM Sundish [76]..... | 32 |
| Figura 7. Receptor de Sandia [85]..... | 33 |
| Figura 8. Maricopa Solar | 37 |
| Figura 9. SES Solar One..... | 39 |
| Figura 10. SES Solar Two | 41 |
| Figura 11. Sistema DISTAL I | 42 |
| Figura 12. Sistema DISTAL II | 43 |
| Figura 13. Sistema EuroDISH | 44 |
| Figura 14. Dispositivo disco Stirling SunCatcher producido por SES..... | 48 |
| Figura 15. Dispositivo disco Stirling producido por Renovalia Energy | 52 |
| Figura 16. Dispositivo disco Stirling PowerDish producido por Infinia [20] | 56 |
| Figura 17. Dispositivo disco Stirling Trinum producido por Innova | 59 |
| Figura 18. Paneles fotovoltaicos..... | 65 |
| Figura 19. Esquema instalación fotovoltaica..... | 66 |
| Figura 20. Célula fotovoltaica | 70 |
| Figura 21. Central solar fotovoltaica | 76 |

| | |
|--|-----|
| Figura 22. Planta de concentración solar fotovoltaica en Latinoamérica..... | 78 |
| Figura 23. Sistema de torre central..... | 93 |
| Figura 24. Discos parabólicos | 94 |
| Figura 25. Colectores cilindro parabólicos..... | 95 |
| Figura 26. Centrales termosolares de torre central y cilindros parabólicos..... | 97 |
| Figura 27. Plantación térmica solar de dispositivos de disco Stirling..... | 98 |
| Figura 28.Central de torre central..... | 102 |
| Figura 29. Esquema de la disposición de elementos en una central de torre | 106 |
| Figura 30. Heliostatos según disposición de campo Norte..... | 110 |
| Figura 31. Heliostatos según disposición circular | 111 |
| Figura 32. Plataforma Solúcar | 116 |
| Figura 33. CESA – I | 121 |
| Figura 34. Gemasolar | 125 |
| Figura 35. Colector cilindro parabólico..... | 125 |
| Figura 36. Componentes colector cilindro – parabólico..... | 127 |
| Figura 37. Sistema de seguimiento solar y dispositivo real de colector cilindro – parabólico | 129 |
| Figura 38. Configuración básica planta de cilindros parabólicos..... | 133 |
| Figura 39. Configuración hibridada de planta de colectores cilindro parabólicos ... | 134 |
| Figura 40. Configuración de planta de colectores cilindro parabólicos con tecnología de salesfundidas | 136 |
| Figura 41. Plataforma SEGS | 138 |
| Figura 42. Central Andasol..... | 142 |
| Figura 43. Esquema planta Andasol | 143 |
| Figura 44. Dispositivo de almacenamiento desarrollado por Infinia | 161 |
| Figura 45. Sistema de SAIC / STM Sundish | 167 |

| | |
|--|-----|
| Figura 46. Receptor DIR de Biodish | 167 |
| Figura 47. Receptor HYPHIRE | 168 |
| Figura 48. Receptor de Sandia [85] | 169 |

Listas de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Comparativa entre los diferentes dispositivos disco Stirling | 60 |
| Tabla 2. Cuadro fabricación de la tecnología fotovoltaica..... | 71 |
| Tabla 3. Evolución de la potencia fotovoltaica instalada | 80 |
| Tabla 4. Resumen con las características de las diferentes plantaciones SEGS..... | 138 |
| Tabla 5. Centrales de cilindro parabólico en funcionamiento | 145 |
| Tabla 6. Centrales de cilindro parabólico en construcción..... | 145 |
| Tabla 7. Eficiencias según tecnología | 150 |
| Tabla 8. Eficiencias según tecnología, desglosado..... | 151 |
| Tabla 9. Clasificación de los diferentes PCM | 160 |
| Tabla 10. Resumen de ventajas e inconvenientes de los diferentes combustibles | 171 |

Lista de gráficas

| | |
|--|----|
| Gráfica 1. Potencia obtenida a lo largo de un día de funcionamiento [20] | 55 |
| Gráfica 2. Potencia instalada en sistemas de conexión a red en los últimos años..... | 73 |
| Gráfica 3. Evolución de la potencia fotovoltaica instalada | 80 |
| Gráfica 4. Evolución potencia solar fotovoltaica instalada en España..... | 82 |



1.- OBJETIVOS / MOTIVACION /

ALCANCE

1. 1.- Objetivos del proyecto

El objetivo fundamental del proyecto se encuentra sustentado por la necesidad de desarrollar tecnologías para la explotación de fuentes de energía renovables. Ello es debido a la necesidad de encontrar alternativas viables a los combustibles fósiles, con la consiguiente reducción de emisiones perjudiciales a la atmósfera y por tanto del deterioro de la capa de ozono, la independencia de combustibles en proceso de agotamiento y la independencia de países exportadores de los mismos. Así pues, el presente proyecto analiza principalmente el estado de desarrollo de una tecnología de aprovechamiento de la energía solar, la tecnología de disco Stirling, cubriendo además el estudio de otras tecnologías de generación eléctrica mediante el aprovechamiento de la radiación solar tales como la fotovoltaica y la empleada en las centrales termosolares.

Para la realización del proyecto, se ha llevado a cabo una revisión del Estado del Arte, a partir de la cual, se estará en condiciones de comprender en qué consiste realmente la tecnología de disco Stirling, así como la evolución que ha ido llevando dicho sistema a lo largo de los años.

Del mismo modo, en éste documento, se ha llevado a cabo un análisis de la situación actual del sistema de disco Stirling, investigando sobre los diferentes proyectos que están siendo llevados a cabo en la actualidad y evaluando los resultados



obtenidos a partir de los mismos, con el fin de ser capaces de extraer conclusiones y estar en disposición de discernir cuáles son las posibles vías de desarrollo del disco Stirling y cuáles son los cuellos de botella o limitaciones del mismo.

Una vez llevadas a cabo la revisión del Estado del Arte y el análisis del estado actual de desarrollo y conocidas las actuales limitaciones técnicas del sistema así como su posible potencial en cuanto a otros aspectos técnicos del mismo se refiere, se estará en condiciones de identificar cuales van a ser las líneas de trabajo de desarrollo del sistema, garantizando unos resultados satisfactorios en el corto y medio plazo.

1. 2.- Motivación

He seleccionado la tecnología de disco Stirling como objeto del presente proyecto porque considero que las tecnologías fundamentadas en el aprovechamiento de fuentes de energías renovables constituyen la base de un futuro tecnológico cada vez más próximo, siendo, en concreto, la tecnología de disco Stirling, una tecnología con un enorme potencial en materia de generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables y que en la actualidad se encuentra en un estado inicial de su fase de desarrollo.

Del mismo modo, considero de gran utilidad la formación en materia de metodologías de investigación adquirida como necesidad intrínseca a la realización del presente proyecto de documentación técnica, con el fin de ser capaz de seleccionar la información veraz y contrastada de la que no lo es, de sintetizar resultados obtenidos de diferentes fuentes y extraer conclusiones de los mismos.



1. 3.- Alcance

El alcance del presente proyecto se ha limitado a una revisión de las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar en general, tales como la energía fotovoltaica y la energía termosolar, así como un análisis de los sistemas de disco Stirling en particular, no entrando en el diseño y dimensionado de los mismos, que quedaría para proyectos de mayor entidad al tratado aquí.



2.- INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo del presente proyecto, se ha creído conveniente, en un primer lugar, realizar una introducción a la tecnología de disco Stirling mediante el desarrollo del motor Stirling, elemento constituyente fundamental de la tecnología objeto de estudio, y del cual se derivan muchas de las propiedades de estos sistemas.

Más adelante, se estudiarán en profundidad los sistemas de disco Stirling, mediante el desarrollo de su ciclo de trabajo, la evolución de estos sistemas, los elementos constituyentes de que se componen y de las instalaciones en las cuales se encuentran implementados.

Del mismo modo, se realizará un análisis del estado actual de desarrollo de los sistemas de disco Stirling mediante el estudio de las diferentes compañías productoras de la tecnología.

Finalmente se realizarán una serie de valoraciones en cuanto a la viabilidad técnica de éstos sistemas que darán lugar, más adelante a las posibles líneas de desarrollo



3.- MOTOR STIRLING

3. 1.- Características generales del motor Stirling

3. 1. 1.- Historia

El motor Stirling fue inventado por el reverendo escocés Robert Stirling en el año 1816, con el objetivo de diseñar un sistema capaz de producir energía mecánica partiendo de una fuente de energía térmica de un modo más seguro y sencillo que con el que contaban hasta entonces, el motor de vapor.

Debido a las altas presiones originadas en el interior de las calderas, a menudo éstas terminaban por explotar dando lugar a accidentes fatales, quedando patente de éste modo la necesidad de diseñar un motor más seguro.

Así mismo, con el motor Stirling se reduce la complejidad del mecanismo. Esto es debido a que mientras que con el motor a vapor era necesario calentar agua en una caldera, producir vapor, expansionarlo en un motor produciendo así trabajo, condensarlo y, mediante una bomba, introducir el agua de nuevo en la caldera; con el motor de tipo Stirling el proceso tiene lugar íntegramente en el interior del mismo.

Por último, y como aspecto más relevante en la implementación y potencial desarrollo en el futuro de éste tipo de motores comentar que presentan unos valores de eficiencia en su funcionamiento que resultan ser los más elevados posibles, situándose en valores próximos a los del Ciclo de Carnot, ciclo ideal, tal y como más adelante se explicará.



3. 1. 2.- Evolución

Con el objetivo de comprender con mayor claridad la evolución a lo largo de la historia de éste motor y el gran potencial del mismo se hace necesario tanto un estudio de la evolución de los recursos energéticos del planeta, así como un análisis de su estado actual, análisis que, por otro lado, pondrá de manifiesto la enorme importancia del desarrollo de ésta tecnología en las próximas décadas.

Todo ello debido, a que uno de los principales retos a los que se va a tener que enfrentar el mundo, en un futuro no muy lejano es el cambio de modelo energético.

Si se repasa brevemente la historia de los recursos energéticos desde la revolución industrial, resulta evidente que el modelo de vida por el que se ha optado se debe en gran medida, por no decir en su totalidad, a la existencia de fuentes de alta densidad de energía y de fácil acceso, pero fuentes no renovables, es decir fuentes de energía cuya capacidad de regeneración es muy lenta comparada con la velocidad de consumo, por lo que terminarán por agotarse.

Debido a este fácil acceso a fuentes de energía abundantes y a los constantes descubrimientos de yacimientos de recursos fósiles durante el siglo XIX y principios y mediados del XX, no ha sido posible la implantación de un modelo energético basado en la eficiencia energética o en sistemas de energía renovables, es decir fuentes cuya velocidad de regeneración es superior a la de consumo.

Sin embargo, y a pesar de tener dos grandes inconvenientes como lo son su menor competitividad y alta aleatoriedad (pues dependen de agentes externos como el



viento, el sol, etc....) y debido a su alta velocidad de regeneración serán las que se haga necesario explotar cuando se agoten las fuentes de energía no renovables o bien, cuando debido a su escasez dejen de tener un precio competitivo en el mercado.

Así y con todo, en los años 1940 y 1950, Philips NV de los Países Bajos comenzó a promulgar el interés por el motor de tipo Stirling moderno. El aumento del precio de los combustibles fósiles junto con el incremento de los daños ambientales causados por los motores de combustión interna indujo a muchos otros a seguir su ejemplo.

Es a partir de 1970 cuando se ha comenzado a extender el pensamiento, en gran medida a partir de la crisis del petróleo, de que el modelo energético basado en fuentes no renovables es inviable a largo plazo. Es por éste hecho, que a partir de dicha fecha comenzaron a ser tenidas en cuenta otras fuentes de energía, que anteriormente no lo habían sido, como son las fuentes de energía renovables mediante el uso de diferentes tecnologías, entre las cuales se encuentran la energía eólica, fotovoltaica, geotérmica, etc.... y entre las que cabe destacar la tecnología de disco Stirling, tecnología objeto de nuestro estudio.

Diversas empresas en todo el mundo comenzaron a desarrollar en éste periodo una serie de tecnologías relacionadas con el motor Stirling, como Receptores Directamente Iluminados, en inglés DIR, recibidores solares tubulares o un motor Stirling desarrollado para aplicaciones automovilísticas. Pero era una tecnología demasiado cara como para ser comenzada a fabricar en masa. No existía la producción en masa de motores Stirling ni posibilidad de crearla, y por otro lado el disco Stirling



exigía una óptica de precisión que no necesitaba la fotovoltaica, estos hechos entre otros, hicieron que el disco Stirling no pasara a ser un bien de consumo, ya que no era competitivo si se lo comparaba con la fotovoltaica o la eólica. Lo que si se logró fue resolver muchos de los retos técnicos que presenta esta tecnología.

Así pues, y aunque como anteriormente se ha comentado, ya se conocía la próxima necesidad de fuentes de energía renovables, industrias como la fotovoltaica y la eólica, que necesitaban mucha menor inversión inicial para su industrialización desbancaron a la tecnología de disco Stirling que quedó en barbecho durante muchos años debido a la falta de recursos económicos.

Así, de este cambio de mentalidad fundado en base a la necesidad energética ya comentada anteriormente, surge la actual industria fotovoltaica y eólica, que aunque con ciertas limitaciones todavía, es una industria rentable. Otras tecnologías tuvieron menos éxito que las ya mencionadas, debido todo ello en gran medida a que desarrollarlas a nivel industrial exigía un desembolso inicial que no las hacía competitivas.

Podría considerarse que es en torno a 1990 que se ha ido adquiriendo una conciencia más ecológica. Problemas como el agujero de ozono, el incremento de los desastres naturales y el deterioro visible de ecosistemas con la reducción de la calidad de vida, entre otros, han hecho que tecnologías que se dejaron en barbecho, no porque fueran malas sino porque el mercado apostó por otras, tengan una nueva oportunidad. Entre las mismas, se hace indispensable nombrar de nuevo la tecnología de disco Stirling, que a pesar de ser inventada en 1816, como ya se ha comentado anteriormente, es en la actualidad cuando realmente se está apostando por su desarrollo y optimización.



Igualmente, de éste modo, cabe exponer una serie de proyectos basados en la tecnología de motor Stirling y que están siendo llevados a cabo en la actualidad, como los desarrollados por la NASA, que está trabajando en el diseño de una central de energía nuclear de Stirling para las estaciones espaciales comerciales del siglo XXII. Así mismo, el Departamento de Defensa de EE.UU. está involucrado en un programa de desarrollo de millones de dólares fundamentado en el desarrollo de alternadores de pistón libre Stirling para su uso en el campo de la generación de energía eléctrica, debido a la enorme ventaja cualitativa que tienen sobre grupos electrógenos convencionales. Del mismo modo, las compañías petroleras y de exploración de gas y la profesión médica también están investigando varias posibilidades con el Stirling.

Así mismo, resulta interesante llevar a cabo una breve comparativa entre los motores Stirling que se están diseñando actualmente y los que fueron producidos en el siglo XIX. La principal diferencia entre ambas generaciones de motores reside en el uso de aleaciones de alta temperatura y procesos de fabricación de los mismos desconocidos entonces. Estos han permitido a los ingenieros mejorar la relación peso – potencia de los motores Stirling, elevando de éste modo su potencia específica en torno a 200 veces a la que presentaban en sus orígenes.

3. 1. 3.- Funcionamiento

El ciclo termodinámico que describe el fluido de trabajo en el interior de un motor Stirling que funcione entre dos temperaturas, la del foco caliente (T_c) y la del foco frío (T_f) corresponde a un ciclo regenerativo que consta de cuatro procesos, a saber:



- **Proceso 1 – 2: Expansión isotérmica debido a la absorción de calor del foco caliente (T_c)**

En el instante en que el pistón se encuentra en un extremo, el fluido aumenta su temperatura debido a una absorción de calor (Q_1) del foco caliente localizado en ese mismo extremo; esto hace que se expanda isotérmicamente desplazando de éste modo el pistón hacia el lado opuesto del motor:

$$\Delta U_1 = 0$$

$$Q_1 = W_1 = P \delta V = (nRTc) / V * \delta V$$

$$Q_1 = nRTc \ln(V_1 / V_2)$$

- **Proceso 2 – 3: Cesión isocórica calor al regenerador en la cual el fluido descende su temperatura y presión**

Una vez realizada la expansión del fluido, éste cede un calor (q_2) que es absorbido por el regenerador:

$$W = 0$$

$$q_2 = \Delta U = mCv (Tc - Tf)$$

- **Proceso 3 – 4: Compresión isotérmica del gas debida a la cesión de calor al foco frío (Tf)**

Cuando el fluido ha alcanzado la máxima expansión y ha cedido parte del calor (q_2) al regenerador, el fluido se traslada al otro extremo de la cámara, donde es enfriado por el foco frío al cual cede un calor (Q_2), lo que provoca una disminución de su volumen, comprimiéndose isotérmicamente,



permitiendo así el máximo desplazamiento del pistón que se dirigía del foco caliente al frío:

$$\Delta U_2 = 0$$

$$Q_2 = W_2 = \rho \delta V = (nRTc) / V * \delta V$$

$$Q_2 = nRTc \ln (V_3 / V_4)$$

- **Proceso 4 – 1: Absorción de calor procedente del regenerador a volumen constante, aumentando su temperatura y presión**

Una vez realizada la compresión el fluido absorbe un calor (q_1) procedente del regenerador en su paso hacia el extremo en contacto con el foco caliente:

$$W = 0$$

$$q_1 = \Delta U = mCv (Tc - Tf)$$

Después se lleva nuevamente al extremo caliente para iniciar un nuevo ciclo. De este modo, se transforma la energía térmica proveniente de una fuente externa de calor en trabajo mediante el movimiento lineal alternativo del pistón entre los focos caliente y frío.

En la figura 1 se muestra el esquema básico de un motor Stirling de un único pistón, sin regenerador y que trabaja entre dos focos térmicos, así como el diagrama termodinámico que sigue el fluido de trabajo encargado de producir la expansión y

compresión necesarias para el movimiento del pistón.

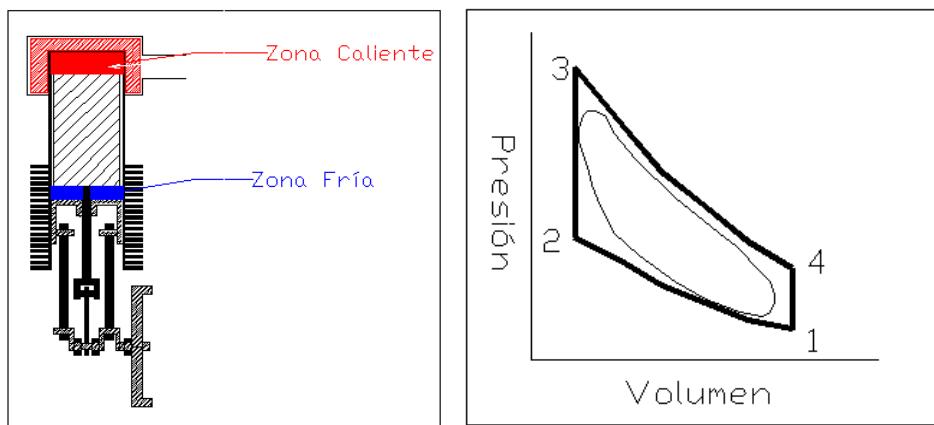


Figura 1. Motor Stirling tipo Beta y diagrama P-V del ciclo termodinámico.

3. 1. 4.- Componentes

En éste apartado se va a realizar una descripción detallada de los componentes fundamentales de un motor Stirling, para de éste modo, estar en condiciones de comprender con mayor claridad su funcionamiento, así como las ventajas e inconvenientes que supone su uso.

- **Cilindros:** Los cilindros constituyen el alojamiento de los pistones y del desplazador, así como del fluido de trabajo que se desplaza de a través de los mismos dependiendo del instante del ciclo en el que se encuentre.
- **Pistones:** Son elementos con una doble función. Por un lado son los encargados de transmitir la potencia generada al cigüeñal, generando así energía mecánica. Por otro lado también son los encargados de contribuir al movimiento del fluido en su recorrido a lo largo de su ciclo de trabajo. Según cuál sea la variante constructiva objeto de estudio, también puede observarse



que los pistones o bien el cigüeñal al cuál transmiten el movimiento los mismos, es el responsable del movimiento alternativo del desplazador.

- **Regenerador:** El regenerador resulta ser un componente clave en el rendimiento de un Motor Stirling. Como se explica más adelante en éste mismo apartado se trata de un componente de elevada importancia si se quiere un rendimiento del motor próximo al ideal. Se trata de un intercambiador situado generalmente a mitad del ciclo de trabajo y cuya función se centra en absorber calor del fluido de modo isocórico cuando éste se encuentra a elevada temperatura, para más tarde devolverle ese mismo calor (teniendo en cuenta el rendimiento del regenerador) de modo igualmente isocórico cuando el fluido se encuentra a baja temperatura y según se acerca al foco caliente. Debido a la importancia que se desprende de éste componente se ha decidido dedicar un apartado explicatorio donde se desarrollará en profundidad.
- **Desplazador:** En alguna de las variantes constructivas del motor Stirling se hace necesaria la instalación de un desplazador que facilite la circulación del fluido de trabajo en su ciclo de funcionamiento a través de las diferentes zonas dentro del motor. Su principal característica es que presenta un diámetro unas décimas menor al diámetro del cilindro, de modo que el fluido puede pasar a lo largo de su longitud, circulando entre cilindro y desplazador, siendo facilitado ese movimiento por el llevado a cabo por el propio desplazador.



- **Foco caliente:** Es la zona en la cual el fluido de trabajo absorbe un calor generado en el exterior y gracias al cual aumenta su temperatura y volumen, realizando de éste modo un trabajo.
- **Foco frío:** Es la zona en la cual el fluido cede un calor al exterior debido a encontrarse a una temperatura superior al mismo.
- **Cigüeñal:** Es el elemento de unión de las partes móviles del motor, así como el encargado de transmitir la potencia generada en el mismo.

3. 1. 5.- Regenerador

La modelización del ciclo termodinámico del motor Stirling siempre parte de la base de que las evoluciones asociadas a la variación de volumen se realizan de modo isotérmico, de modo que durante la expansión se produce la introducción de calor del ciclo y durante la compresión se produce la extracción, lo que hace, que una vez que el fluido se ha expandido, se encuentre a la misma temperatura a la que ese encontraba antes de la aportación de calor, lo que permite introducir el concepto de regenerador.

Al operar el fluido entre dos focos a distintas temperaturas, uno caliente y uno frío, se cumple que el calor asociado a su enfriamiento es el mismo que el asociado a su calentamiento, lo que permite introducir un elemento que almacene el calor cuando una vez expandido, el fluido debe operar a baja temperatura y ceder calor con el fin de realizar la compresión isotérmica; para después de la misma volver a absorber dicho

calor con el fin de aumentar su temperatura antes de pasar a la cámara caliente donde se expansionará.

Una vez integrado el regenerador en el ciclo de funcionamiento de un motor Stirling, y con objeto de justificar la instalación del mismo, se puede concluir que dicho motor opera con un fluido en un ciclo cerrado, obteniendo trabajo a partir de cuatro procesos cíclicos consecutivos, a saber: expansión con el aporte de calor del foco caliente, compresión debida a la extracción de calor hacia un acumulador térmico regenerativo, compresión con extracción de calor hacia el foco frío y expansión debida a la absorción del calor almacenado por el regenerador, siendo por tanto superior el trabajo neto obtenido con regenerador que el obtenido sin el mismo para un mismo calor absorbido en el foco caliente, resultando por tanto un rendimiento mayor, tal y como más tarde se demostrará numéricamente.

A continuación se muestra el esquema conceptual de un motor Stirling donde el fluido está confinado dentro de un cilindro entre dos pistones opuestos. En medio, dividiendo el espacio, se dispone el regenerador, que atravesado por el fluido lo condiciona para adecuarlo a la temperatura de la cámara en que se encuentra. A un lado se dispone la cámara de compresión, a baja temperatura, y al otro la de expansión, a alta temperatura.

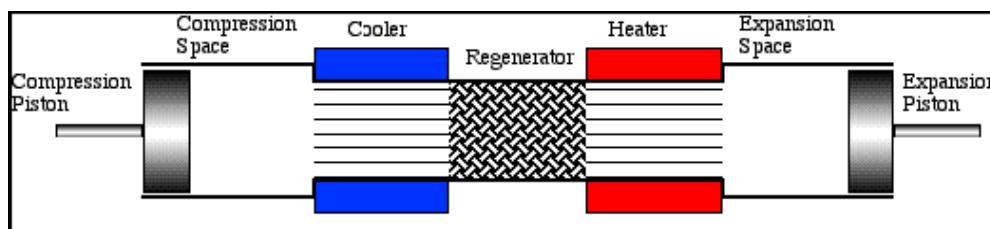


Figura 2. Motor Stirling con regenerador.



3. 1. 6.- Características: Ventajas e inconvenientes

A continuación y con el objeto de poner de manifiesto cuales son las características de éste tipo de dispositivos se va a proceder a una enumeración lo más esquemática posible tanto de las ventajas que presenta su uso como de las limitaciones del mismo.

- **Ventajas:**

- Presenta valores de eficiencia que resultan ser los más elevados desarrollados hasta el momento, acercándose a los valores obtenidos en el ciclo ideal o Ciclo de Carnot. Esta característica, junto a otras que se mencionan en éste mismo apartado son las que realmente convierten a éste dispositivo en una alternativa viable para la generación de energía, tal y como se desarrollará en los próximos apartados.
- Mediante un diseño adecuado y convenientemente desarrollado del motor Stirling es posible obtener dos pulsos de fuerza por cada vuelta del cigüeñal, lo que hace de éste motor el más eficiente que se conoce, con un rendimiento próximo al ideal, perteneciente éste último al ciclo de Carnot, tal y como se concretará más adelante.
- Son capaces de generar simultáneamente energía mecánica, o eléctrica si se acopla un alternador al dispositivo y energía térmica. Esta tecnología de producción simultánea de energía en diferentes formas es conocida como cogeneración y será desarrollada convenientemente en apartados venideros.



- Posibilidad de una gran variedad de fluidos de trabajo encargados de realizar la expansión compresión isotérmicas, entre los que destacan el helio, hidrógeno, aire e incluso sustancias en estado líquido siguiendo un circuito sellado herméticamente, de modo que idealmente no se dan escapes del fluido a lo largo del proceso.
- Al no tener lugar ningún tipo de explosión asociada al funcionamiento del motor, se tiene un dispositivo altamente silencioso.
- Del mismo modo, debido a la inexistencia, tal y como ya se ha comentado, de explosiones en su interior, se puede garantizar una esperanza de vida alta para estos motores, situada en torno a las 100.000 horas de funcionamiento.
- Puede funcionar con cualquier fuente de calor, con lo cual resulta ser un generador altamente versátil. La temperatura de trabajo más alta, ubicada en el foco caliente, para un motor relativamente potente se sitúa en torno a los 600 – 900°C.
- Puede seleccionarse para su funcionamiento un proceso de combustión continuo, con lo que se eliminan la mayor parte de las emisiones (NO_x, hollines, hidrocarburos,...)



- Al no tener lugar el proceso de combustión en su interior no queman aceite, lo que resulta en una necesidad de mantenimiento muy baja, casi nula, además de aumentar, tal y como ya se ha comentado, la vida útil de cada uno de sus componentes.
 - Presentan un buen funcionamiento con bajas temperaturas
- .
- **Inconvenientes:**
 - Baja potencia específica con respecto a otros motores, como los de combustión interna, que para un mismo tamaño de motor, desarrollan potencias mucho más elevadas.
 - El máximo rendimiento en éste tipo de motores se obtiene para regímenes de giro relativamente bajos, por lo que no resulta un motor útil si se quieren desarrollar elevadas potencias a elevadas revoluciones.
 - No arranca instantáneamente. Precisa de un tiempo de precalentamiento y puesta en marcha que junto con su baja potencia específica lo convierten en un generador no del todo conveniente para aplicaciones automovilísticas.



propulsión híbrida eléctrica o en la producción de electricidad de base de carga, donde esa producción constante es deseable.

- El hidrógeno por su baja viscosidad, alto calor específico y conductividad térmica es el fluido de trabajo por excelencia en términos de termodinámica y dinámica de fluidos. Sin embargo presenta problemas de confinamiento y difusión a través de los metales. Por ello se usa generalmente helio con propiedades muy semejantes, que además es inerte, y no inflamable como el hidrógeno.
- La disipación de calor en el foco frío es complicada porque el refrigerante se mantiene a la temperatura más baja posible para aumentar la eficiencia térmica. Esto incrementa el tamaño de los radiadores, lo que dificulta los diseños compactos. Esto junto con los costes de materiales, ha sido uno de los principales factores limitantes a la hora de su uso en automoción.

3. 1. 7.- Rendimiento

La definición de rendimiento para una máquina térmica es:

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{absorbido}}}$$

Siendo el trabajo neto (W_{neto}) el debido a la expansión y compresión isotérmicas, puesto que durante los procesos isocóricos no se realiza trabajo, y considerando válida



la modelización como gas ideal del fluido de trabajo confinado en el motor, se tiene que el trabajo neto es:

$$W_{\text{neto}} = nRT_C \ln \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \right) + nRT_F \ln \left(\frac{V_{\min}}{V_{\max}} \right)$$

Donde V_{\min} y V_{\max} son los volúmenes mínimo y máximo que se alcanzan en la compresión y expansión isotérmicas, y T_C , T_F las temperaturas de los focos caliente y frío respectivamente. Así mismo, definiendo la relación de compresión como $r = V_{\max} / V_{\min}$ y aplicando propiedades del logaritmo, la expresión obtenida para el trabajo neto se reduce a:

$$W_{\text{neto}} = nR(T_C - T_F) \ln(r)$$

Por otro lado, y en el supuesto de que en el mecanismo motor objeto de estudio no esté presente un regenerador, como anteriormente se ha comentado, el fluido termodinámico, sólo absorbe calor durante dos etapas: el calentamiento isocórico y la expansión isotérmica, de modo que para el caso de modelizar dicho fluido como gas ideal, el calor absorbido en el proceso (Qabsorbido) se obtiene del siguiente modo:

$$Q_{\text{absorbido}} = nC_p(T_C - T_F) + nRT_C \ln(r)$$

Mientras que, si en el motor se instala un regenerador, con objeto de mejorar el rendimiento del mecanismo, debido a su capacidad de almacenar el calor cedido por el gas durante el enfriamiento a volumen constante para luego devolverlo al sistema durante el proceso de calentamiento, se tiene, que, si bien ambas cantidades son iguales en módulo, puesto que se tratan de procesos isocóricos entre las mismas dos



temperaturas, el regenerador no es perfecto y parte de esa energía se pierde, definiendo por lo tanto su eficiencia como $\eta_R = Q_{devuelto} / Q_{cedido}$, y resultado con ello el calor absorbido el siguiente:

$$Q_{absorbido} = (1 - \eta_R) nC_p (T_C - T_F) + nRT_C \ln(r)$$

Así pues, incorporando los últimos valores obtenidos el rendimiento total de la máquina resulta el siguiente:

$$\eta = \frac{nR(T_C - T_F)\ln(r)}{(1 - \eta_R)nC_V(T_C - T_F) + nRT_C \ln(r)}$$

De éste modo, como cierre al desarrollo matemático del rendimiento de un Motor Stirling, puede concluirse que en la medida que el funcionamiento del regenerador se acerca al caso ideal, el rendimiento del ciclo se aproxima al del ciclo de Carnot:

$$\eta_R \rightarrow 1 \Rightarrow \eta \rightarrow 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

4.- TECNOLOGIA DE DISCO STIRLING

4. 1.- Descripción y análisis de los sistemas de disco Stirling

En éste apartado, se va a realizar una revisión de los sistemas de disco Stirling, analizando tanto su evolución con el paso de los años como la función que lleva a cabo cada uno de los componentes que los constituyen. Finalmente, se hará un análisis del estado de desarrollo de la tecnología mediante el estudio de las diferentes plataformas en las cuales está implementada ésta tecnología.

4. 1. 1.- Introducción

Los sistemas de disco parabólico son pequeños equipos de generación de energía que convierten la energía térmica de la radiación solar en energía mecánica y luego en energía eléctrica, del mismo modo en que las centrales eléctricas convencionales convierten la energía térmica de la combustión de un combustible fósil en electricidad.



Figura 3. Dispositivos de disco Stirling



Los sistemas disco Stirling utilizan un espejo o conjunto de espejos para reflejar y concentrar la radiación proveniente de los rayos del sol en un receptor, con el fin de alcanzar las temperaturas necesarias para convertir eficientemente el calor en trabajo. La radiación solar concentrada es absorbida por el receptor y transferida a un motor. Esto exige que el plato siga la trayectoria del sol en dos ejes.

Los sistemas disco Stirling se caracterizan por una gran eficacia, ya que han demostrado el más alto coeficiente de conversión de energía solar a eléctrica, situándose en torno al 26 %; una gran modularidad, lo que le permite operar de manera individual para aplicaciones remotas, o agruparse en pequeños grupos y conectarse a la red; y una inherente capacidad híbrida, esto es, la capacidad para operar con energía solar, con combustible fósil, o ambas cosas, para proporcionar energía las 24 horas, conectando, por ejemplo, un quemador de gas al receptor, tal y como se desarrollará convenientemente en apartados venideros.

Esta tecnología se encuentra en la etapa de desarrollo y los técnicos siguen enfrentándose con desafíos en relación con los componentes más idóneos para trabajar con energía solar y con la capacidad comercial de un motor capaz de funcionar con la energía del Sol. Sin embargo, ya hay instalaciones que han implementado ésta tecnología a gran escala. Por ejemplo SES [74], puede considerarse que ya emplea ésta tecnología para la producción propiamente dicha. De todos modos y a pesar de la existencia de instalaciones en funcionamiento para la producción comercial de energía eléctrica, se trata de una tecnología que puede considerarse todavía en fase de desarrollo.



Así, si se estudian los avatares de la historia de la tecnología del disco y por ende del motor Stirling, se puede descubrir su paralelismo con la historia de los recursos energéticos y la oportunidad que se le presenta al mundo con esta tecnología.

4. 1. 2.- Historia de los sistemas disco Stirling

La tecnología de los sistemas disco Stirling es la más antigua de las tecnologías termosolares y se remonta al año 1800, cuando varias empresas demostraron la posibilidad de desarrollar sistemas solares basados en los ciclos de Rankine y de Stirling.

La tecnología moderna fue desarrollada en la década de 1970 y a principios de 1980 por las compañías United Stirling AB [71], Advanco Corporation [72], McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA) [73], el Laboratorio de Propulsión de la NASA y el DOE. Esta tecnología se basaba en la utilización de tubos de fluido que reciben directamente la radiación solar y en pesadas estructuras de elevado coste.

En Australia, ya en el año 1978, el Energy Research Center (ERC) [83] de la Universidad de Camberra construyó en White Cliffs una de las primeras centrales termoeléctricas del mundo, constituida por 14 discos parabólicos de 20 m² que funcionaron durante varios años. Solar Systems [84] convirtió la planta termoeléctrica en fotovoltaica. Posteriormente, ERC construyó y ensayó un disco parabólico de 400 m² y 50 kWe. Solar Systems también ha construido desde entonces varios prototipos de discos parabólicos.



La primera generación de discos estuvo formada por configuraciones facetadas de vidrio/metal, que se caracterizaron por unas altas concentraciones ($C=3.000$) y excelentes resultados, pero a precios muy elevados situándose por encima de los 300 Euros/ m^2 para grandes producciones y estructuras muy pesadas.

El disco Vanguard fue operado en Rancho Mairage, California, en el desierto de Mojave durante un periodo de 18 meses comprendido entre Febrero de 1984 y Julio de 1985, incorporando un motor Stirling de 25 kWe proporcionado por United Stirling AB. El gas de trabajo era hidrógeno y la temperatura de 720 °C.

Posteriormente, entre 1984 y 1988, McDonnell Douglas desarrolló un disco con la misma tecnología pero con algunas mejoras. Se construyeron seis unidades de 25 kWe que operaron varias compañías eléctricas. Transferida a Boeing, la licencia de la tecnología la posee el consorcio SES, que desde 1988 está relanzando su aplicación con la denominación de disco SES/Boeing. El nuevo prototipo ha acumulado más de 8.000 horas de operación.

El proyecto europeo EuroDISH [80] (1998-2001), con participación de empresas españolas (Inabensa [81], CIEMAT-PSA [53-55]), mejoró los prototipos anteriores mediante el rediseño del concentrador y motor, revisión y simplificación del sistema de seguimiento y control y utilización de hidrógeno como fluido termoportador. Se construyeron tres unidades EuroDISH ensayadas en Vellore (India), Milán (Italia) y la Plataforma Solar de Almería.



Posteriormente, el proyecto alemán EnviroDISH [82] (2002-2005), además de incorporar mejoras de los componentes del prototipo EURODISH, comenzó a preparar su introducción en el mercado. Así, en el año 2004 se construyeron tres unidades de referencia en Odeillo (Francia), Sevilla y Würzburg (Alemania). La potencia generada por las dos últimas se vende a tarifa de las redes eléctricas española y alemana.

A principios de 2006, se aprobó en California el proyecto Stirling Energy Systems of Arizona 2 (SES Solar 2). Este proyecto podría tratarse de la primera instalación de envergadura de discos Stirling en el mundo. La planta de 300 MWe y un total de 12.000 discos reflectores con receptores de hidrógeno, se ubicará en el desierto de Imperial Valley. Cabe esperar que este proyecto marque el despegue del mercado para los dispositivos con tecnología Stirling. Además, hay que reseñar otros desarrollos en EE.UU. involucrando a empresas como LaJet, Solar Kinetics [75], SAIC [76], Acurex y WG. Actualmente en EE. UU hay más proyectos relacionados con la tecnología de disco Stirling en desarrollo, sin embargo, aquí simplemente se han nombrado los que se consideran más relevantes.

En las últimas décadas, los sistemas de disco parabólico han evolucionado tanto en Europa como en EE.UU. hacia la construcción de unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco, con potencias que oscilan entre valores de 7 a 25 kWe de potencia. Los sistemas disco Stirling presentan una alta eficiencia en la conversión de la radiación solar en energía eléctrica, entre 25 - 30 %, en condiciones nominales de operación. Además, se pueden conseguir relaciones de concentración superiores a 3.000, lo que permite alcanzar temperaturas entre 650 y 800 °C y eficiencias nominales en los motores Stirling entre 30 – 40 %.



La experiencia operacional con sistemas disco Stirling se circunscribe a unas pocas plataformas, ubicadas fundamentalmente en EE.UU, como Maricopa Solar, con tecnología SunCatcher de Stirling Energy Systems, SES [74]; en España, como Distal – I, Distal – II y el proyecto EuroDISH, ubicados las tres en la Plataforma Solar de Almería (PSA) [55]; y en California, como Calico Solar con tecnología también SunCatcher de SES.

En Europa, los principales desarrollos se han llevado a cabo por empresas alemanas, como Steinmüller [77], SBP [78] y SOLO Kleinmotoren [79]). Éstas desarrollaron seis unidades de 9-10 kWE, tres de ellas ensayadas en la Plataforma Solar de Almería, con más de 30.000 horas de operación. Se trata de sistemas que llevan una significativa reducción de costes, aunque a cambio de menores rendimientos. El motor trabaja con helio a 630°C y presenta rendimientos del 20 %, sensiblemente inferior a los planteados por Boeing/SES.

Los logros que se están alcanzando, gracias a la hibridación, optimización de procedimientos de arranque y control, etc..., hacen prever unos costes de generación inferiores a 0.12 - 0.20 Euros/kWh [78] a corto plazo, en función de los parámetros de radiación solar, que dependen de cada ubicación en concreto. No obstante, pese al enorme potencial a largo plazo de esta tecnología, debido a sus elevadas eficiencias y su modularidad, la limitación en cuanto a su potencia unitaria (inferior a 25 kWe) obstaculiza muchas aplicaciones que pretenden la producción eléctrica a gran escala.

Así, tienen su aplicación más obvia en la producción de electricidad para autoconsumo en lugares aislados donde no llegue la red eléctrica (bombeo de agua en pozos, suministro de electricidad a núcleos de viviendas rurales, etc.), donde cabe esperar que puedan competir con sistemas ya comerciales como los fotovoltaicos o los generadores diesel, a pesar de que su primera aplicación en fase de producción sea para las grandes plantas solares comentadas anteriormente, entre las que destacan las de SES.

4. 1. 3.- Componentes del sistema

A continuación se va a realizar una breve descripción de los componentes que constituyen un dispositivo de disco Stirling para más adelante, poder estar en condiciones de comprender con una mayor exactitud cuál es su funcionamiento así como también las principales características técnicas que determinan a estos dispositivos.

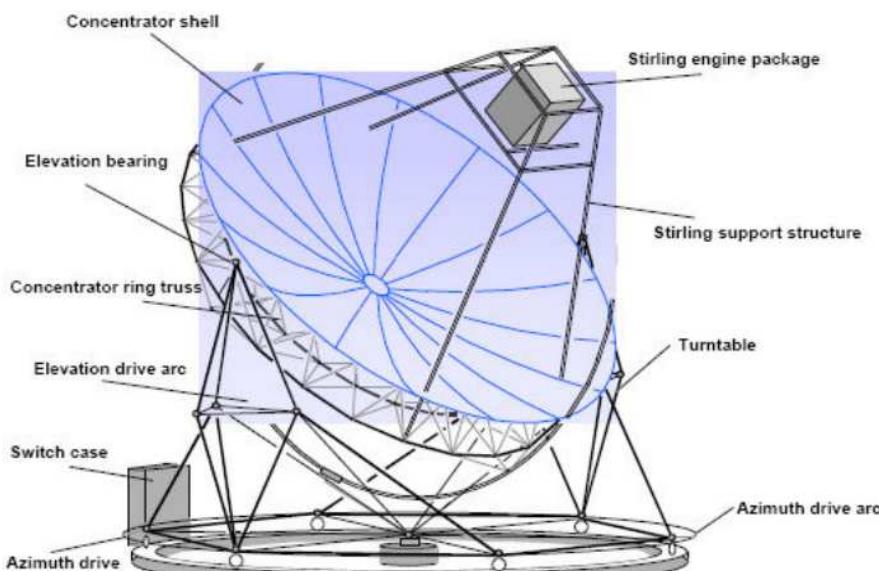


Figura 4. Esquema de la disposición de los elementos constituyentes en un dispositivo disco Stirling



- **Concentrador solar parabólico:**

Los sistemas disco Stirling utilizan concentradores solares que realizan el seguimiento del sol en dos ejes. Estos concentradores poseen una superficie reflectante que, ya sea de metal, de vidrio o de plástico, refleja la radiación solar incidente en una pequeña región llamada foco, o zona focal. El tamaño del concentrador solar para los sistemas disco Stirling queda determinado por el motor utilizado. A modo de ejemplo, puede determinarse que con un máximo directo de irradiación solar de 1000 W/m^2 , un sistema disco Stirling de 25 kWe tendrá un diámetro del concentrador de aproximadamente 10 m.

Los concentradores utilizan superficies reflectantes de diversos materiales. Por ejemplo, los concentradores utilizados por la empresa SBP [78] se realizan con planchas de plástico reforzado y con fibra de vidrio. Sin embargo, las superficies de reflexión más duraderas resultan ser espejos de plata y vidrio, similares a los espejos decorativos utilizados en el hogar. Del mismo modo, los intentos de desarrollar a bajo coste películas reflectantes poliméricas han tenido un éxito limitado debido a su rápida degradación.

Por otro lado, los discos concentradores tienen longitudes focales cortas, lo que hace necesarios espejos de cristal relativamente delgados con un espesor de aproximadamente 1 mm para poder conseguir las curvaturas requeridas. Además, es deseable que el cristal posea un bajo contenido de hierro para mejorar su capacidad para reflejar la luz. Dependiendo del espesor y de los materiales que se utilicen, los espejos solares tienen rendimientos de reflexión en un rango del 90 – 94 %.

El concentrador de forma ideal es un paraboloide de revolución. Algunos concentradores solares aproximan esta forma con múltiples espejos en forma esférica sujetos mediante una estructura apropiada.

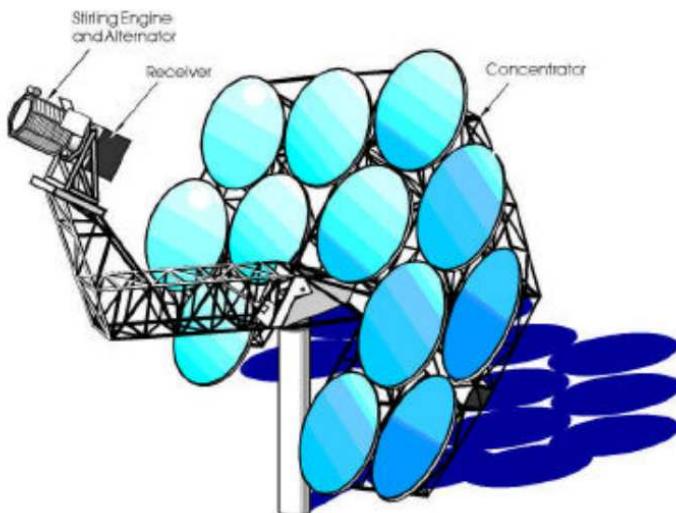


Figura 5. Concentrador solar con múltiples espejos.

El diseño óptico del concentrador y su precisión determinan el coeficiente de concentración. El coeficiente de concentración, que se define como flujo medio solar que atraviesa la apertura del receptor, dividido por la irradiación solar normal directa del ambiente, se sitúa generalmente en valores por encima de 2.000, lo cual permite obtener temperaturas de operación muy altas. Las fracciones interceptadas, que se definen como el porcentaje del flujo de energía solar reflejada a través apertura del receptor, son por lo general más del 85%.



El seguimiento en dos ejes se puede realizar de dos maneras: (1) seguimiento de elevación-acimutal, y (2) el seguimiento en coordenadas polares. Con seguimiento de elevación-acimutal, el plato gira en un plano paralelo a la tierra (acimut) y en otro plano perpendicular a ella (la altitud). Estos sistemas proporcionan al colector la capacidad de rotar a izquierda / derecha y arriba / abajo mediante el uso de un pequeño servomotor.

La tasa de rotación varía a lo largo del día, pero se puede calcular fácilmente. La mayoría de los sistemas disco Stirling más grandes utilizan este método de seguimiento (un programa de ordenador predice la posición del sol en cada momento). En el método de rastreo polar, el colector gira en torno a un eje paralelo al eje de rotación de la tierra. En la actualidad, su escaso uso se da en sistemas pequeños (la orientación hacia el sol es determinada por un sensor de seguimiento).

Un punto importante a destacar en la implementación de los sistemas de seguimiento, es que requieren bancadas de hormigón con altas exigencias, para proporcionar al sistema la estabilidad suficiente, que se ve alterada con el movimiento del mismo debido al sistema de seguimiento.

- **Receptor:**

El receptor resulta ser el dispositivo de enlace entre el concentrador y el motor Stirling. Tiene dos tareas fundamentales:

- Absorber la radiación solar reflejada por el concentrador.

- Transmitir esta energía absorbida al motor Stirling en forma de calor con las mínimas pérdidas.

Los receptores empleados en los discos parabólicos son receptores de cavidad en los que la radiación concentrada entra por una apertura, situada en el foco del paraboloide, incidiendo posteriormente sobre el absorbedor. De esta forma se consigue disminuir las pérdidas radiactivas y convectivas, así como homogeneizar el flujo radiante incidente sobre el absorbedor y reducir su valor máximo.

En la actualidad, existen dos tipos de receptores utilizados en sistemas disco Stirling, a saber, receptores de tubos de iluminación directa (DIR) y receptores de reflujo.

- Receptores de iluminación directa (DIR):

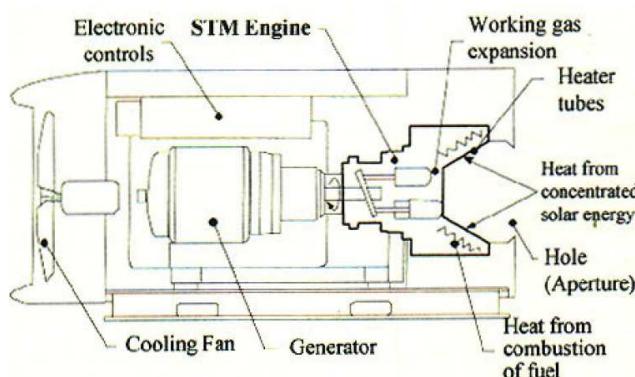


Figura 6. Receptor DIR. Sistema de SAIC / STM Sundish [76].

Los receptores directamente iluminados permiten una adaptación directa del calentador de los motores Stirling convencionales. En estos receptores el

absorbedor está formado con un haz de tubos por donde circula el fluido de trabajo del motor (helio o hidrógeno) altamente presurizado (5 - 20 MPa). La radiación incide directamente sobre estos tubos y es transformada en energía térmica y transmitida al fluido de trabajo. Las altas temperaturas de trabajo de estos absorbedores (del orden de 800°C) dificultan el empleo de recubrimientos selectivos por el gran solape de la radiación emitida y absorbida. Un inconveniente de estos receptores es la falta de uniformidad en el flujo de radiación incidente en el absorbedor, lo cual trae como consecuencia el que la temperatura de los tubos absorbedores presente picos, limitando por tanto la máxima temperatura del fluido de trabajo para evitar sobrepasar la máxima temperatura permitida en los materiales.

- **Receptores de reflujo:**

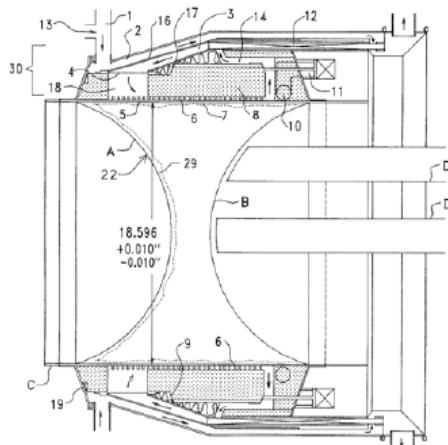


Figura 7. Receptor de Sandia [85].

Este tipo de receptores emplea un fluido intermedio para la transmisión del calor, generalmente un metal líquido (normalmente sodio), mediante su evaporación en la superficie del absorbedor y su condensación en los tubos



por donde circula el fluido de trabajo. Al condensar el metal líquido, por gravedad regresa a la superficie del absorbedor.

En la actualidad se intenta emplear este tipo de receptores debido a las ventajas que presentan:

- La gran capacidad de transmisión del calor de los metales líquidos (hasta 800 W/cm²) permite desarrollar receptores más pequeños.
- Mediante la condensación de este metal líquido se consigue un calentamiento más uniforme del fluido de trabajo, y este se produce realmente a temperatura constante, lo que permite trabajar con temperaturas máximas del fluido de trabajo más cercanas a las máximas admisibles por los materiales.
- Permite el diseño independiente de receptor y motor, evitando los compromisos de diseño entre ambos que limitaban el rendimiento en el caso de los receptores de tubos directamente iluminados.
- Se facilita la hibridación del sistema.

- **Alternador:**

Es el dispositivo de conversión de la energía mecánica en eléctrica utilizado en los sistemas disco Stirling. Los motores Stirling utilizan generadores de inducción para poder acoplarse a la red. Al sincronizarse los generadores con la red estos pueden suministrar potencia trifásica, ya sea a 230 o a 460 voltios.



Estos generadores son capaces de convertir la energía mecánica en electricidad con una eficiencia de alrededor del 94 %. El sistema dispone de unos inversores que convierten la corriente continua en alterna. Ello permite emplear máquinas de corriente continua como generadores, pudiendo funcionar a régimen de giro variable, teniendo con ello más flexibilidad para adaptarse a la demanda de electricidad instantánea.

- **Sistema de refrigeración:**

Los motores necesitan transferir al medio ambiente grandes cantidades de calor debido a sus capacidades estructurales. Los motores Stirling utilizan un radiador para realizar el intercambio de calor entre el motor y la atmósfera.

- **Controles:**

El modo de funcionamiento autónomo se logra mediante el uso de controladores electrónicos situados en el disco parabólico para el control de la función de seguimiento y para regular el funcionamiento del motor. Algunos sistemas utilizan un controlador de motor por separado.

En las grandes instalaciones existe un Sistema de Control y de Adquisición de Datos (SCADA) que se utiliza para poder monitorizar y supervisar el funcionamiento del sistema, y para recoger sus principales datos de funcionamiento, de manera sincronizada con otras instalaciones de producción de energía eléctrica.



- **Motor:**

Fundamentalmente estos sistemas incorporan un motor de tipo Stirling.

Sin embargo, existen también otros ciclos termodinámicos y fluidos de trabajo que pueden funcionar correctamente en estos sistemas, entre los cuales pueden destacarse los ciclos de Rankine, utilizando agua o un fluido de trabajo orgánico y ciclos de Brayton. Así pues, los motores más utilizados son por lo general de tipo Stirling. En estos sistemas disco-motor el calor también puede ser suministrado por un quemador de gas suplementario para permitir funcionamiento durante tiempo nublado y por la noche, lo que se conoce como hibridación y que se desarrollará más adelante.

El motor en un sistema disco Stirling convierte el calor en energía mecánica de una manera similar a los motores convencionales, por la compresión de un fluido de trabajo cuando está frío, el cual se calienta durante la compresión y que, a continuación, se expande a través de una turbina o con un pistón para producir trabajo. Posteriormente, la energía mecánica se convertirá en energía eléctrica gracias a un generador de energía eléctrica o alternador.

La producción eléctrica actual de los prototipos de sistemas disco Stirling se sitúa alrededor de 25 kWe, existiendo unidades más pequeñas, proporcionando energía eléctrica desde 1 kWe.

4. 1. 4.- Plataformas de concentración de dispositivos disco Stirling

En éste apartado, tal y como ya se había adelantado en la introducción, se va a realizar un estudio de algunas de las plantas termosolares tanto en fase de producción como en fase de desarrollo, que incorporan dispositivos de tipo disco Stirling. Aquí, en concreto, van a ser analizadas dos de las plataformas más importantes que incorporan la tecnología de SES, como Maricopa Solar y Calico Solar y las que se encuentran ubicadas en la PSA.

- **Plataformas con tecnología desarrollada por SES [74]:**

- **Maricopa Solar [86]:**

La Planta Solar de Maricopa se trata de un proyecto de demostración en fase de producción de 1,5 MWe de energía solar de concentración, situado en Peoria, en el estado de Arizona, EE. UU, fruto del acuerdo de colaboración firmado por Tessera Solar [87], con sede en Texas, que pagará los derechos de explotación a Salt River Project, SRP por 10 años y la tercera compañía energética estatal SRP, que comprará parte de la energía producida por la planta. El proyecto inició sus operaciones la última semana de Diciembre de 2009, para finalmente ser inaugurada la planta en Enero de 2010.



Figura 8. Maricopa Solar



La planta cuenta con 60 dispositivos SunCatcher, de 25 kWe de potencia eléctrica cada uno, los cuales han sido suministrados íntegramente por la empresa que los diseña y fabrica, Stirling Energy Systems (SES), con sede en Arizona. Por otro lado, con sede en Irlanda, NTR [88], empresa de energía, resulta ser el accionista mayoritario de Tessera Solar y SES.

Así pues, el proyecto constituido por los 60 discos SunCatcher, se encuentra situado junto a la Estación Generadora de Agua Fría, operada y propiedad de SRP, quien, como ya se ha comentado anteriormente, comprará parte de la energía eléctrica generada en la plataforma Maricopa para ser empleada en la propia Estación Generadora de Agua Fría, motivo determinante a la hora de decidir el emplazamiento final de la planta.

Por último señalar que el éxito que ha obtenido la planta de Maricopa ha llevado a cabo las funciones de mecanismo impulsor para el despliegue nacional de grandes proyectos comerciales, como los que posteriormente han sido anunciados en California y Texas, generando un total de 1.600 MWe de potencia eléctrica.

- **Solar One [144]:**

El 2 de diciembre de 2008, Stirling Energy Systems Solar One, presentó una solicitud de certificación (AFC) para construir y operar el proyecto denominado como Stirling Energy Systems Solar One, SES Solar One, un proyecto fundamentado en la tecnología de disco Stirling en San Bernardino, California.

En enero de 2010, el proyecto cambió formalmente su nombre al proyecto Calico Solar. La construcción del proyecto comenzó a principios del año 2011 y se prevé sea inaugurado aproximadamente en Mayo del año 2014.

El proyecto propuesto Calico Solar tendrá una potencia nominal de 850 MWe, generada por 30.000 dispositivos SunCatcher de 25 kWe de potencia eléctrica cada uno.

El proyecto construido abarcará una superficie aproximada de 3.300 hectáreas ubicada en el Condado de San Bernardino, California. La mayor parte de la potencia del proyecto será generada en las horas punta, cuando la demanda de electricidad sea mayor.



Figura 9. SES Solar One.



- **Solar Two [145]:**

El 30 de junio de 2008, Stirling Energy Systems Solar Two, presentó una solicitud de certificación (AFC) para construir y operar el proyecto denominado como Stirling Energy Systems Solar Two, SES Solar Two, un proyecto fundamentado también en la tecnología de disco Stirling, situado en el Condado Imperial, en California.

En febrero de 2010, la empresa pidió formalmente que el proyecto de cambiar su nombre por el de Imperial Valley Solar. El proyecto comenzó su construcción a principios del año 2010 y está prevista su inauguración en torno a Mayo del año 2013.

El proyecto Imperial Valley Solar / SES Solar Two, que abarca una superficie de 2600 hectáreas, tendrá una potencia nominal de 750 MWe, generada por aproximadamente 30.000 dispositivos SunCatcher de 25 kWe cada uno y será construido en dos fases diferentes.

La Fase I del proyecto consistirá en la instalación de 12.000 dispositivos SunCatcher configurados en 200 grupos de 60 SunCatchers, dando lugar cada uno a una potencia de 1,5 MWe. De éste modo, en la Fase I, se tendrá una potencia neta instalada de 300 MWe.

La fase II consistirá fundamentalmente en la instalación de 18.000 dispositivos SunCatchers, de modo que se conseguirá ampliar el proyecto inicial hasta alcanzar un total de 30.000 dispositivos SunCatcher instalados,

configurados en 500 grupos de 1,5 MWe cada uno, dando lugar a una potencia neta total de generación de 750 MWe.



Figura 10. SES Solar Two.

- **Plataforma Solar de Almería (PSA) [55]:**

En la plataforma PSA pueden encontrarse tres proyectos, en fase de desarrollo, fundamentados en la tecnología de disco Stirling llevados a cabo desde el año 1992 y que van a ser desarrollados a continuación.

- **DISTAL - I [90]:**

Se trata de un proyecto implementado en el año 1992 y que desde entonces se ha mantenido operativo hasta la actualidad. Se trata de un proyecto que inicialmente constaba de tres unidades de disco Stirling, presentando un disco concentrador de 7,5 m de diámetro capaces de recoger hasta 40 kWt de energía térmica, con un motor Stirling SOLO V160 capaz de generar hasta 9 kWe de potencia eléctrica, 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 en el centro de su foco de 12 cm de diámetro. Así mismo presenta una distancia focal es de 4,5 m y un sistema de seguimiento polar.



Figura 11. Sistema DISTAL I.

- **DISTAL - II [90]:**

Como primer intento por obtener un sistema de mejores prestaciones y un coste por kilovatio eléctrico producido más reducido, se llevó a cabo el proyecto DISTAL II. Durante los años 1996 y 1997 fueron instalados y puestos en operación rutinaria tres nuevos discos basados también 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. La distancia focal era en ésta caso de 4,1 m y el valor máximo de concentración es de 16.000.



Figura 12. Sistema DISTAL II.

- EuroDISH [90]:

Por último, fue llevado a cabo el proyecto EuroDISH, de modo que se diseñaron y construyeron dos nuevos prototipos de disco parabólico con motor Stirling, en los cuales se pretendía actuar sobre diferentes aspectos, entre los que pueden destacarse una reducción del precio de los componentes mediante la identificación de elementos de uso estándar en la industria, el desarrollo de un nuevo sistema de fabricación para el disco concentrador, esto es, se ha abandonado la tecnología de membrana tensionada y se ha utilizado un sistema de moldes y materiales compuestos. Por otro lado también se ha realizado una mejora sobre el motor Stirling SOLO V161, especialmente de aquellos componentes utilizados en la cavidad que recibe la energía solar concentrada.

También se ha llevado a cabo el desarrollo de un nuevo procedimiento optimizado para le montaje del sistema.



Figura 13. Sistema EuroDISH.



4. 2.- Listado de empresas en desarrollo y producción de la tecnología

Con el objeto de comprender cuál es el estado de desarrollo en el que se encuentra la tecnología de disco Stirling en la actualidad, se va a realizar un análisis de las principales empresas que producen estos sistemas.

Para la búsqueda de las diferentes compañías productoras de los sistemas disco Stirling se ha empleado internet como fuente de información.

Así pues, de mayor a menor importancia dentro del sector, se puede distinguir, **Stirling Energy Systems (SES)**, empresa estadounidense fundada en 1996 y productora de los dispositivos SunCatcher, presentes en plataformas como Maricopa Solar o Calico Solar; **Renovalia Energy**, empresa española ubicada en Albacete, emplea motores Stirling desarrollados por Infinia produce su propia tecnología de disco Stirling, presentes en la planta termosolar ubicada en Cuenca; **InfiniaCorp**, empresa estadounidense fundada en 1967, destaca por ser una de las principales empresas productoras de motores Stirling, los cuales incorpora en la tecnología de disco Stirling desarrollada también por la propia empresa, como el sistema PowerDish; y por último, **Innova Technology Solutions SpA**, empresa italiana fundada en el año 2000, importa los motores Stirling de la empresa Microgen Engines y los incorpora en los dispositivos de disco Stirling desarrollados por la propia empresa, como Trinum.



4. 2. 1.- Stirling Energy Systems, Inc (SES)

- **INFORMACION GENERAL:**

Fundada en el año 1996 y con sede en Scottsdale, Arizona, EE. UU, Stirling Energy Systems, Inc, (SES) [74] cuenta entre los miembros de su equipo, con la colaboración de Peter Becker, director de tecnología y entre sus socios con la aportación de Sandia National Laboratories [85] y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), así como algunos de sus principales inversores, entre los que se encuentran Green Plains Renewable Energy, Inc [91], Tessera Solar [87], Wind Capital Group [92], y Greenstar [93].

SES se formó y adquirió todas las patentes de diseño e ingeniería fundamentadas en la tecnología de disco Stirling que habían sido desarrolladas durante casi tres décadas por algunos de los mejores ingenieros del mundo y los científicos en las operaciones de Ford para el Desarrollo Avanzado , McDonnell-Douglas Aeroespacial [73] y de Defensa y Aeroespacial y de Defensa de Boeing.

Poco después, el SES puso en marcha dos políticas estratégicas y de colaboración público-privadas con los Laboratorios Nacionales Sandia, en Albuquerque, Nuevo México, EE.UU. y los Estados Unidos Departamento de Energía (DOE). Desde entonces, SES rediseñado el dispositivo SunCatcher, ha perfeccionado su diseño, rendimiento y coste, dejándolo listo para su comercialización.



- **DISCO STIRLING:**

Hoy en día, el SunCatcher se trata de un dispositivo fundamentado en la tecnología disco Stirling, capaz de generar 25 kWe, captando energía proveniente de la radiación solar. Así pues, la tecnología SunCatcher no precisa de ningún tipo de combustible, produce cero emisiones al ambiente y utiliza menos agua que otras tecnologías solares.

El sistema SunCatcher incorpora tres controladores informáticos bien diferenciados encargados respectivamente del posicionamiento y seguimiento según dos ejes distintos para aprovechar al máximo la radiación solar, formando el disco un ángulo de 90° con el patrón de la mayor radiación solar directa, del control de desempeño de las temperaturas en el funcionamiento del dispositivo para la generación eléctrica y un control de las instalaciones y adquisición de datos, diseñado para maximizar la eficiencia global de la energía solar a la red de electricidad de calidad y el costo de operaciones de la planta y de gestión.

Así pues, el sistema SunCatcher resulta ser un dispositivo altamente modulable, generando mediante 25 kWe eléctricos por unidad plantaciones que presentan una potencia instalada desde 1 MWe hasta 1.000 MWe, mediante la adhesión consecutiva de ejemplares. Por otro lado se trata de un sistema que oferta una gran flexibilidad a la hora de seleccionar su emplazamiento, esto es, permite desniveles del terreno hasta del 10 %, aumentando de éste modo el abanico de superficies disponibles para su explotación.

También resulta interesante el hecho de ser un dispositivo que no requiere de absolutamente nada de agua en su funcionamiento, siendo necesaria solamente para los procesos de lavado de los discos, una característica que convierte a ésta tecnología en altamente viable de ser implementada en grandes áreas ubicadas en los desiertos, que presentan una gran planitud y elevado número de horas de radiación solar al día, motivo por el cual fue el dispositivo seleccionado para ser empleado en la planta Maricopa Solar [86], en Arizona, en el desierto del Mojave y en la planta Calico Solar [89], California.

Por último señalar que se trata del dispositivo con las mayores eficiencias diseñado hasta el momento, dando lugar a una eficiencia promedio del 26 %, alcanzando en valores pico el 31.25 %.



Figura 14. Dispositivo disco Stirling SunCatcher producido por SES.



- **APLICACIONES:**

Tal y como ya se ha comentado, la primera planta de energía SunCatcher, a escala comercial, entró en funcionamiento a principios del año 2010, en la planta Maricopa Solar, generando un total de 1.5 MWe de potencia eléctrica.

4. 2. 2.- Renovalia Energy

- **INFORMACION GENERAL:**

Renovalia Energy [93] nació hace más de diez años en Villarrobledo, Albacete, para dar suministro eléctrico a la compañía industrial de la familia Ortega Martínez, Grupo Forlasa [94]. Esta iniciativa surgió del deseo de ofrecer soluciones energéticas asequibles y renovables, combatir el cambio climático y mejorar la vida de las personas, eliminando las fuentes de energías tradicionales, altamente contaminantes, de sus procesos de producción.

En un importante giro estratégico, la familia Ortega se desprendió del negocio lácteo de Forlasa para dedicar sus esfuerzos a las energías renovables. Grupo Forlasa nació en 1970 de la mano de Bernardo Ortega. La compañía francesa Lactalis [95] se hizo con el negocio a principios de 2010.

Renovalia Energy es una compañía especializada en la promoción, ingeniería, construcción, explotación y venta de electricidad generada a través de fuentes de energía renovable (eólica, solar fotovoltaica, solar fotovoltaica de concentración, solar termoeléctrica y mini-hidráulica).



La compañía, presente en siete países (España, EEUU, Canadá, México, Italia, Rumanía y Hungría), cuenta con más de 570 MWe operativos y en construcción divididos en diez parques eólicos, seis parques solares fotovoltaicos, una central minihidráulica y una planta termosolar. Tiene una **cartera de proyectos** de más de 2.400 MWe diversificada tanto desde un punto de vista geográfico como tecnológico.

Hoy en día, Renovalia Energy es una de las compañías de referencia en el sector y posee uno de los mix energéticos más equilibrados del mercado, lo que la ha convertido en una de las mayores productoras de energías limpias. La compañía ha mantenido siempre una estrategia empresarial de continua inversión, con el objetivo de abaratar las tecnologías renovables, reducir el impacto ambiental de las mismas e incrementar su presencia en el mercado tanto a nivel nacional como internacional. Así, Renovalia consiguió evitar en 2009 la emisión a la atmósfera de 380.399 toneladas de CO₂, el equivalente al dióxido de carbono que absorbe un bosque de más de 1.000.000 de árboles en toda su vida.

Renovalia está presente en todos los eslabones de la cadena de valor. A través de su división de ingeniería, la compañía presta servicios técnicos, de consultoría, construcción, operación y mantenimiento de sus instalaciones. Concretamente en el ámbito solar, Renovalia diseña y fabrica sus propias estructuras metálicas de soporte de paneles, seguidores monoaxiales y biaxiales, componentes eléctricos, dispositivos de comunicaciones para inversores, y sistemas de control y seguimiento de sus instalaciones.



Renovalia Energy ha conseguido convertirse en un referente global en el sector de las energías renovables a lo largo de los últimos años. El liderazgo de Renovalia se manifiesta en términos cuantitativos (más de 570 MWe en operación y construcción, pipeline de 2,4 GWe a desarrollar en los próximos años) y cualitativos (evidenciado por el reconocimiento de marca nacional e internacional, su fuerte inversión en I+D+i y tecnologías pioneras, o sus extensas relaciones institucionales y alianzas comerciales, entre otros).

- **DISCO STIRLING:**

A pesar del hecho de ser una compañía que trabaja con un gran abanico de tecnologías en materia de generación de energía a partir de fuentes renovables, aquí se va a centrar el estudio de ésta empresa en el desarrollo de proyectos de tecnología de disco Stirling bien llevados a cabo o bien en promoción por Renovalia Energy.

Esta tecnología está compuesta básicamente por una parábola reflectante y un generador de combustión externa de tipo Stirling. El sistema, a diferencia de las tecnologías de primera generación, no necesita agua ni gas, es silencioso y de tamaño reducido. Al no necesitar agua, esta tecnología no tiene restricciones en cuanto a su ubicación. Además, se caracteriza por la reducida operatividad de su construcción, siendo necesarios tan solo 6 meses frente a la media de 24 meses de otras tecnologías, alta eficiencia de hasta un 24 %, frente al 12 % de los paneles fotovoltaicos y el 13-15 % de los cilindros parabólicos termosolares de primera generación, y por su autonomía y bajo mantenimiento.



Figura 15. Dispositivo disco Stirling producido por Renovalia Energy.

- **APLICACIONES:**

De éste modo, el 4 de Mayo de 2010. Renovalia Energy, puso en operación la primera planta de energía termosolar de segunda generación del mundo. La planta cuenta con una capacidad de 1 MWe de potencia y está situada en el municipio de Casas de los Pinos, Cuenca.

Denominada Casa del Ángel Termosolar [96], la planta utiliza generadores de combustión externa de tipo Stirling de la compañía estadounidense Infinia junto a la tecnología de Renovalia Energy, que la compañía desarrolla y comercializa a nivel mundial.

Para la construcción de Casa del Ángel Termosolar, se han empleado espejos reflectantes de la compañía Rioglass [97] y materiales fabricados por empresas españolas del sector auxiliar del automóvil. De hecho, éste era uno de los objetivos de Renovalia Energy a la hora de desarrollar la energía termosolar de segunda generación:



no sólo reducir los costes de producción de la energía, y que ésta pueda competir con los combustibles fósiles en un futuro, sino generar también crecimiento en el tejido empresarial español.

Por otro lado, además de Casa del Ángel, Renovalia Energy tiene preasignados 71,39 MWe de energía termosolar en España. Se trata de 8 proyectos, que utilizarán esta revolucionaria tecnología, y que estarán situados en las localidades de Villarobledo (Albacete) y Puertollano (Ciudad Real). Comenzarán a estar operativos en 2012 y 2013.

Renovalia Energy, a través de su división de ingeniería, también desarrollará proyectos de energía termosolar de segunda generación para terceros. De hecho, la compañía ya ha llegado a importantes acuerdos con destacadas empresas del sector en esta área. Es el caso de los firmados con Iberdrola Renovables [98] para la evaluación de esta tecnología en España, y la creación de un joint venture con Gamesa [99] para el desarrollo e integración de las energías eólica y solar.

4. 2. 3.- InfiniaCorp

• INFORMACION GENERAL:

InfiniaCorp [20], tal y como ya se ha comentado en apartados anteriores, se trata de una empresa fundada en el año 1967, siendo a partir de 1985, cuando dedica toda su capacidad de investigación y desarrollo a la tecnología fundamentada en los motores de tipo Stirling, de alta fiabilidad y sistemas de energía para empresas comerciales y agencias gubernamentales.



Infinia, con base en Kennewick, EE. UU., es una empresa privada con el apoyo significativo de GLG Partners [100], Vulcari Capital, Captial de Wexford, Idealab [101], Equus y Power Play Energy [102], empresas del sector energético. Por otro lado, además de tener su sede en Washington, Infinia cuenta con presencia, mediante oficinas comerciales, en Madrid, Tokio, Nueva Delhi, Los Angeles y Albuquerque.

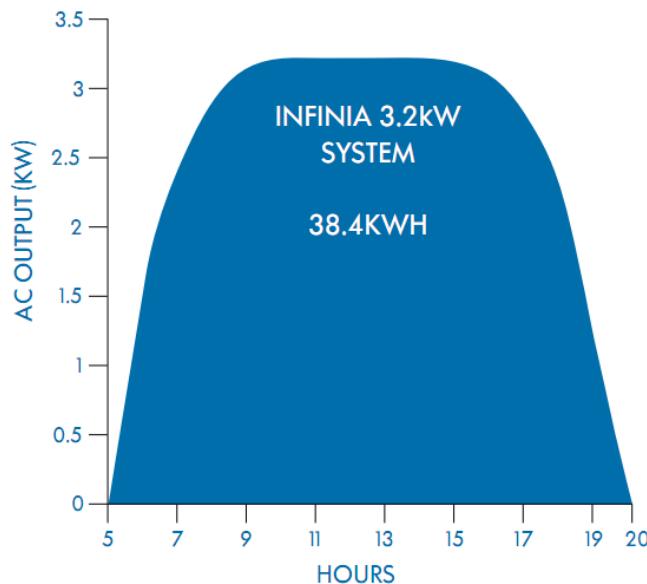
- **DISCO STIRLING:**

Actualmente, el último producto desarrollado por la compañía es denominado como PowerDish. Se trata de un dispositivo fundamentado en la tecnología de disco Stirling que comenzó a producirse a gran escala a finales del año 2010, tras un largo periodo de pruebas y pre-producción.

El PowerDish emplea un disco parabólico con superficie especular para concentrar los rayos del procedentes de Sol en el foco caliente del motor Stirling, creando de éste modo la diferencia de temperaturas necesaria para que éste se ponga en movimiento generando de así la energía eléctrica requerida, motor que por otro lado, ha sido diseñado e instalado en el dispositivo PowerDish por la propia compañía, siendo autosuficiente en éste sentido en el abastecimiento de la tecnología de motor Stirling.

El PowerDish presenta una eficiencia media del 24 % y es completamente recicitable. Por otro lado, cada unidad de PowerDish es capaz de suministrar hasta 3,2 kW_e de potencia eléctrica, que puede ser directamente aportada a la red general de distribución sin la intervención de ningún tipo de alternador, debido a que al incorporar en su funcionamiento un motor Stirling convenientemente adaptado genera directamente corriente alterna.

A continuación se muestra un diagrama orientativo donde puede apreciarse la cantidad de potencia eléctrica en kilovatios que se obtiene en función de la hora del día en la que se encuentra en funcionamiento. Este gráfico, por supuesto, está sujeto a variaciones en función de la región de funcionamiento.



Gráfica 1. Potencia obtenida a lo largo de un día de funcionamiento [20].

Del mismo modo, presenta unas dimensiones relativamente reducidas para la potencia eléctrica que es capaz de suministrar, ya empleando un disco concentrador de 4,7 m de diámetro, presenta una altura de 5,6 m y una superficie, medida sobre el suelo en el que se instala de $21,62 \text{ m}^2$, dando lugar a un total de 860 kg de peso por unidad. También resulta especialmente llamativo su bajo nivel de ruido durante su funcionamiento, situándose el mismo por debajo de los 60 dB a 10 m, lo que equivale a un nivel de conversación moderada.

Así mismo resulta un dispositivo relativamente sencillo de transportar y montar debido a estar compuesto únicamente por cinco elementos constituyentes, a saber, unidad de calor, chasis, reflector, dispositivos seguidores del Sol y dispositivos de control.

Una de las características más atractivas tanto desde el punto de vista tecnológico como económico de éste dispositivo, como lo es su elevada modularidad, ya que una única unidad supone la generación de 3,2 kWe de potencia eléctrica y pueden seguir añadiéndose unidades a la instalación hasta completar un suministro final de varios megavatios. Esta última característica lo hace altamente interesante por dar lugar a inversiones paulatinas evitando de éste modo un elevado desembolso inicial. Sin embargo, en contraposición a lo recientemente explicado, la producción de éste tipo de dispositivos actualmente está orientada a gran escala, no pudiéndose por tanto adquirir unidades aisladas para aplicaciones particulares.

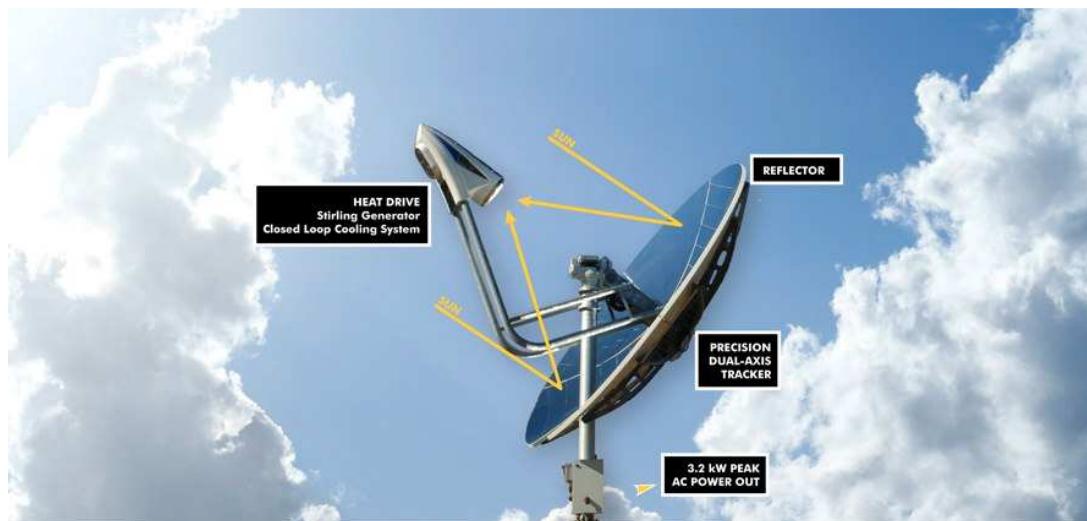


Figura 16. Dispositivo disco Stirling PowerDish producido por Infinia [20].



- **APLICACIONES:**

Infinia está trabajando actualmente en el diseño y desarrollo de dispositivos individuales que puedan funcionar también no solo con energía solar si no con biomasa, dando lugar a 1 kWe de potencia eléctrica, tecnología conocida como hibridación.

Por último señalar la enorme importancia que supone la instalación de éste dispositivo en materia de obtención de energía eléctrica a partir de una fuente renovable de energía como es el Sol, ya que con el empleo de un único dispositivo PowerDish pueden evitarse anualmente la emisión de 6.000 kg de dióxido de carbono, 30 kg de óxido de nitrógeno y 15 kg de dióxido de azufre

4. 2. 4.- Innova Technology Solutions SpA

- **INFORMACION GENERAL:**

Fundada en el año 2000 por el italiano A. Sutti, Innova [103] nació de la idea de crear una empresa que ha concentrado su interés en las tecnologías capaces de obtener los beneficios competitivos y el liderazgo comercial en los mercados internacionales. La compañía tiene su sede en Chieti y Cosenza, Italia.

Hasta el año 2005, Innova apostó por el estudio de los sistemas de seguridad capaces de detectar intrusiones en áreas exteriores y sistemas de detección a través del empleo del escáner de láser en 3D.

Sin embargo, es a partir de ésta fecha cuando Innova comenzó a ser una empresa activa en la explotación de la energía solar para la generación de energía distribuida



eléctrica y térmica a través de sistemas innovadores con un impacto ambiental bajo o incluso nulo.

- **DISCO STIRLING:**

Así pues, después de cinco años de investigación y desarrollo de la tecnología de disco Stirling, Innova presentó a Trinum el 8 de Septiembre de 2010. Se trata de un dispositivo de disco Stirling capaz de generar 1kWe de potencia eléctrica y 3 kWt de potencia térmica, en forma de agua caliente, generalmente aprovechada para calefacción, lo que se conoce como cogeneración.

De éste modo, se ha estimado para un único dispositivo Trinum una producción media anual de 2.100 kWh de energía eléctrica con una eficiencia del 13 % que puede ser directamente suministrada a la red, sin necesidad de inversor y 6.400 kWh de energía térmica, con una eficiencia del 40 %.

Por otro lado, resulta interesante destacar el hecho de que resulta ser un dispositivo capaz de soportar vientos de hasta 50 km/h cuando se encuentra en funcionamiento y vientos de hasta 160 km/h cuando se encuentra cerrado, ya que tiene un sistema de autoprotección mediante el cual se cierra sobre si mismo refugiándose de éste modo de condiciones atmosféricas adversas como pueden ser vientos superiores a 50 km/h, lluvia, etc...

Del mismo modo cabe destacar que Trinum es 100 % recicitable, esto es, está compuesto fundamentalmente de aceros, aluminio, hierro y cobre, todo materiales fácilmente reciclables para poder usarse de nuevo en el proceso productivo. Por otro

lado, la vida media estimada para los motores Stirling, proporcionados por Microgen Engine Corporation [10] y adaptados por Innova para aplicaciones solares e instalados en los dispositivos Trinum es de 100.000 horas.

Trinum cuenta también con un sistema automático para el seguimiento solar y con dispositivos de transmisión digital para el control remoto, de modo, que según la latitud a la que se encuentre el Sol, Trinum puede emplear once, diez o nueve partes de su disco parabólico concentrador, suponiendo tal medida una reducción de costes importante.

Con un peso de 190 kg, un diámetro de disco de 3,7 m y una superficie eficaz necesaria de 15 m^2 y con la misma producción de energía eléctrica y térmica, Trinum hace uso de una superficie que es aproximadamente la mitad que la empleada por los paneles fotovoltaicos tradicionales. Así pues, puede considerarse, que en las mismas condiciones, Trinum genera un 40 % más de energía eléctrica que su equivalente en superficie e inversión económica en paneles fotovoltaicos convencionales.



Figura 17. Dispositivo disco Stirling Trinum producido por Innova.



- **APLICACIONES:**

Finalmente, indicar que Trimun está desarrollado para su aplicación en empresas de pequeño o mediano tamaño que necesitan tanto calor como electricidad, así como una solución viable a la distribución o producción de energía eléctrica y térmica en lugares con gran número de horas de Sol al día y con poblaciones dispersas, a las cuales es difícil distribuir electricidad, siendo las principales zonas de distribución de ésta tecnología las que se extienden por el sur de Italia, sur de América, como Chile y Argentina y norte de África, como Túnez y Libia e India.

Finalmente, y con el objetivo de mostrar la información anteriormente presentada de un modo más claro y esquemático, de forma que se puedan apreciar mejor las diferencias existentes entre unos dispositivos y otros, se ha creído conveniente la elaboración aquí de una tabla comparativa que se muestra a continuación.

| Dispositivo | Trinum | PowerDish | SunCatcher | Dish Stirling |
|------------------------|-----------------------------|-------------|------------|------------------|
| Compañía | Innova Technology Solutions | InfiniaCorp | SES | Renovalia Energy |
| Año | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 |
| P. Eléctrica (kWe) | 1 | 3,2 | 25 | n.a |
| E. Eléctrica (%) | 13 | 24 | 26 | 24 |
| Pr. E. Eléctrica (kWh) | 2100 | xxx | n.a | n.a |
| P. Térmica (kWt) | 3 | xxx | xxx | xxx |
| E. Térmica (%) | 40 | xxx | xxx | xxx |
| Pr. E. Térmica (kWh) | 6400 | xxx | xxx | xxx |
| Diámetro (m) | 3,75 | 4,7 | n.a | n.a |
| Altura (m) | 4,5 | 5,6 | n.a | n.a |
| Superficie (m2) | 15 | 21,62 | n.a | n.a |
| Peso (kg) | 190 | 890 | n.a | n.a |
| Producción | G. Escala | G. Escala | n.a | n.a |

Tabla 1. Comparativa entre los diferentes dispositivos disco Stirling.



4. 3.- Viabilidad técnica

Una vez realizada una revisión del estado de desarrollo en que se encuentra la tecnología de disco Stirling, mediante el estudio de los principales dispositivos desarrollados por las diferentes empresas del sector, se va a proceder, a realizar un análisis de la viabilidad técnica de la misma, con el objetivo de estar en condiciones de entender cuáles han de ser las líneas futuras de desarrollo para éste tipo de sistemas, dónde es necesaria hacer una mayor inversión económica en I+D y en qué sector puede ser realmente competitiva su implementación.

Actualmente, la tecnología de disco Stirling se centra, de modo general, en la producción de energía eléctrica a partir de la concentración de la radiación solar, siendo capaz de proporcionar una potencia eléctrica que abarca un rango de entre 1 y 25 kW con una eficiencia del 26 %, dependiendo de la empresa productora. Del mismo modo, resultan dispositivos relativamente grandes, con diámetros de disco de 4 – 5 m aproximadamente, superficies eficaces necesarias de en torno a 20 m² y pesos que alcanzan los 890 kg.

De éste modo, los valores tan elevados de masas que resultan, unido a la tecnología de seguimiento solar en dos ejes hace que resulten dispositivos realmente inestables y para los cuales, la elección del terreno supone un complejo dilema, no pudiéndose superar, en general, desniveles del 10 % y siendo necesarias enormes bancadas que aseguren su estabilidad.



Por último mencionar, que debido al elevado costo que la producción de la tecnología de disco Stirling supone, la mayoría de las empresas destinan su uso para grandes plataformas, dando lugar a potencias eléctricas finales de 1 – 1000 MW, esto es, para la producción de energía eléctrica en centrales solares de alta concentración.

Por otro lado, al tratarse de dispositivos que incorporan un motor Stirling para la generación de energía eléctrica, cualquier fuente de calor o combustible puede ser empleado para su funcionamiento. De éste modo, estos dispositivos alcanzan un gran potencial cuando se hibridan, alternando el empleo de energía solar durante el día y biomasa o gas natural durante la noche o periodos transitorios en los cuales las condiciones atmosféricas no dejan absorber esa radiación correctamente. Igualmente resulta interesante su implementación cuando se cuenta con algún método de almacenamiento de energía de modo que pueda ser empleada en las situaciones en las que la radiación solar no está disponible.

Del mismo modo resulta especialmente útil su implementación cuando se trata de generar simultáneamente energía eléctrica y térmica, esto es, se emplean con cogeneración. Algunos dispositivos, como Trinum, desarrollado por la empresa Innova Techonology Solutions ya incorporan éste tipo de medidas.

Por otro lado, el hecho de ser dispositivos de grandes dimensiones, y potencias relativamente bajas en relación a su tamaño, hace que no resulten del todo rentables en instalaciones destinadas a la producción masiva de energía eléctrica, ya que precisan de grandes superficies, en las que, actualmente, debido a su estado de desarrollo y costes de producción, resulta más interesante instalar paneles fotovoltaicos.



Sin embargo, el hecho de que las empresas destinen su producción y compra en grandes cantidades se debe a los altos costes de producción de ésta tecnología, de modo que un posible punto a evaluar en cuanto a la evolución de éstos sistemas podría estar sujeto al diseño de un sistema de producción fundamentado en los mismos procesos productivos automatizados que los componentes destinados a automoción, por ejemplo.

Por último, y a modo de resumen de todo lo anteriormente comentado, podría concluirse que el verdadero potencial de estos sistemas pasa por la hibridación de los mismos, a ser posible con biomasa, única fuente renovable y almacenable a la vez conocida hasta el momento, y empleados con cogeneración, esto es para la producción simultánea de calor y electricidad. Además añadir, el verdadero potencial de ésta tecnología no está situado en torno a la producción masiva de energía eléctrica para suministrar a la red, debido a sus enormes dimensiones, tal y como se ha comentado líneas más arriba, si no en la producción de electricidad y energía térmica mediante sistemas individuales en poblaciones o lugares a los que a pesar de ser necesario, resulta relativamente complicado hacer llegar la energía eléctrica por los métodos convencionales.



5.- REVISIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA SOLAR

5. 1.- Energía fotovoltaica VS energía solar térmica

La energía fotovoltaica y la energía solar térmica, representan las dos grandes tecnologías a la cabeza de las tecnologías en materia de aprovechamiento de la energía solar.

En el siguiente apartado se va a desarrollar cada una de éstas dos variantes por separado, abarcando de éste modo tanto una descripción detallada de cada tecnología como su utilidad en el aprovechamiento de la energía solar como fuente de energía renovable, para finalmente concluir el mismo con una breve comparativa directa entre éstas dos tecnologías con el fin de poder apreciar más claramente sus diferencias.

5. 1. 1.- Energía fotovoltaica

Introducción

El aprovechamiento de la energía solar mediante células fotovoltaicas consiste en la generación de energía eléctrica mediante la foto – detección cuántica de un determinado dispositivo, normalmente una lámina metálica semiconductora, llamada célula fotovoltaica. Otros métodos de generación de energía eléctrica a partir de la

captación de energía solar están en fase de desarrollo, como pueden ser los métodos de base orgánica.



Figura 18. Paneles fotovoltaicos

Una de las características más importantes que se desprende el uso de estos sistemas es la posibilidad de generar energía eléctrica en el mismo punto en que se produce el consumo, se eliminan las pérdidas asociadas a la transmisión y distribución de la misma, que oscilan en torno a valores del 8 % al 12 % y del 16 % al 22 % [27], respectivamente. Así mismo, resulta interesante destacar que no producen ningún tipo de contaminación ni efecto nocivo, presentando costos de operación y mantenimientos incomparablemente inferiores a generados por las centrales termoeléctricas y que debido a su diseño modular, permiten inversiones de forma progresiva.

La energía eléctrica generada puede ser empleada del mismo modo que la tomada directamente de la red de distribución general. De éste modo, dos son comúnmente los destinos de aprovechamiento de ésta energía. Por un lado constituye una alternativa altamente interesante en la generación de energía eléctrica mediante el empleo de energías renovables. Por otro lado, resulta ser una de las pocas tecnologías capaces de suministrar energía eléctrica a refugios y casas relativamente aisladas.

Sin embargo, ésta tecnología presenta un gran inconveniente, y es la elevada inversión inicial que requiere la instalación de éste tipo de sistemas, dando lugar, como ejemplo, en el caso de una instalación para abastecer de la energía eléctrica necesaria a una familia, a una inversión inicial superior a 30.000 Euros [28], lo que la convierte en una tecnología relativamente cara para un uso doméstico.

Elementos constituyentes

A continuación se van a enumerar y a explicar brevemente algunos de los componentes más usuales que se pueden encontrar en éste tipo de sistemas y que ayudará a comprender mejor explicaciones y desarrollos venideros.

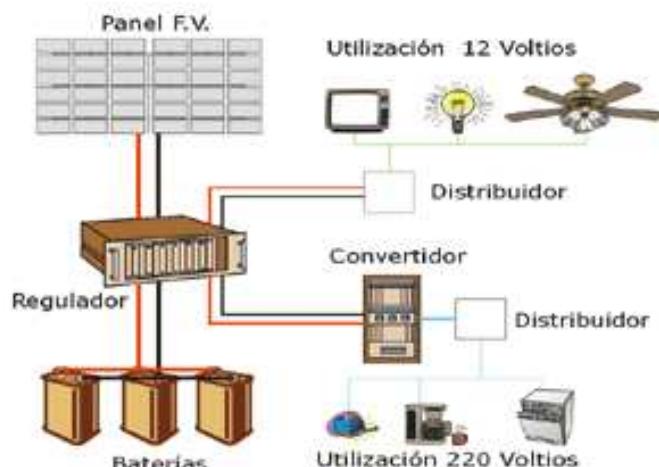


Figura 19. Esquema instalación fotovoltaica

- **Generador solar:**

Se trata de un conjunto de paneles fotovoltaicos que captan la energía solar y la transforman en corriente continua a baja tensión. Más adelante se explica con más detalle estos elementos.



- **Acumulador:**

Es el elemento encargado de almacenar la energía eléctrica producida por el generador solar.

- **Regulador de carga:**

Su función es evitar sobrecargas o descargas excesivas al acumulador, puesto que los daños podrían ser irreversibles. Debe asegurar que el sistema trabaje siempre en el punto de máxima eficiencia.

- **Inversor:**

Se encarga de transformar la corriente continua producida por el campo fotovoltaico en corriente alterna, la cual alimentará directamente a los usuarios.

Paneles fotovoltaicos

Los paneles o módulos fotovoltaicos, conocidos comúnmente como paneles solares, están formados por un conjunto de celdas (células fotovoltaicas) que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ello. El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se denomina potencia pico, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, que son:

- Radiación de 1000 W/m²
- Temperatura de célula de 25 °C (no temperatura ambiente).



Por otro lado, resulta interesante destacar que las placas fotovoltaicas pueden dividirse en [29] [30] [31]:

- **Cristalinas:**

- **Silicio puro monocristalino:** se componen de secciones de un único cristal de silicio, reconocibles por su forma circular u octogonal, donde los cuatro lados cortos, si se observa, se aprecia que son curvos, debido a que es una célula circular recortada. Resultan ser placas rígidas y deben ser montadas en soportes rígidos también para su protección. Son las más eficientes, con valores del 15 – 25 % y las más caras de producir.
- **Silicio puro policristalino:** están formadas por pequeñas partículas cristalizadas. Deben ser montadas en un marco rígido. Son un poco menos eficientes, que las placas monocristalinas, con valores del 14 – 20 %, pero también un poco más económicas
- **Silicio puro esférico:** están compuestas por pequeños corpúsculos de silicio, como gotas de silicio. Consisten en una matriz de pequeñas células solares esféricas capaces de absorber la radiación solar con cualquier ángulo.

- **De capa delgada:**

- **Silicio amorfo:** se dan cuando presentan silicio que no se ha cristalizado. Son manufacturadas mediante la deposición de una fina capa de silicio amorfo en una gran variedad de superficies. Debido a la naturaleza amorfa de la capa cristalina, es flexible, y si se coloca sobre un soporte flexible también, el panel solar puede ser flexible. Una característica muy importante



de estas placas es que su potencia se reduce con el tiempo, mayoritariamente durante los primeros meses, después de los cuales se mantiene prácticamente estable. Son las placas menos eficientes, dando lugar a valores del 6 – 8 % y más económicas de construir.

- **Teluro de cadmio:** rendimiento en torno al 8 %.
- **Arseniuro de Galio:** uno de los más eficientes con un rendimiento del 20 %.
- **Diseleniuro de cobre en indio:** con un rendimiento en torno al 9 %.
- **Tándem:** combinan dos tipos de materiales semiconductores diferentes logrando un rendimiento del 35%. Cada material aprovecha una parte solamente de la radiación solar y por este motivo la unión de dos o tres aumenta el rendimiento al poder aprovechar una parte mayor del mismo. En caso de tres materiales se llegaría a un rendimiento del 50%.

Por otro lado, hay que destacar que su efectividad es mayor cuanto mayores son los cristales que las constituyen, pero también su peso, grosor y coste.

Así pues, los módulos o paneles fotovoltaicos están constituidos por un cristal o lámina transparente situado en la zona superior y un cerramiento situado en la zona inferior del panel, de modo que entre ambas superficies queda encapsulado el sustrato conversor y sus conexiones eléctricas. La lámina inferior puede ser transparente, pero lo más frecuente es el empleo de un material termoplástico conocido como Tedlar.

Para encapsular se suele añadir unas láminas finas y transparentes de EVA (Etileno Vinil Acetato), polímero termoplástico, también conocido como goma EVA, que se funden para crear un sellado anti humedad que las previene de la corrosión y posibles deterioros.



Figura 20. Célula fotovoltaica.

A continuación, se muestra una tabla con diferentes materiales empleados en la producción de paneles fotovoltaicos. Puede observarse que no aparece el silicio en disposición esférica. Esto se debe a que a pesar de ser una tecnología conocida, no es tan empleada como el resto.



| CUADRO RESUMEN DE LA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA | | | | | | |
|--|----------------|-----------|---|--|---|--|
| TIPO DE CELDA | EFICIENCIA (%) | | | DESVENTAJAS | FABRICANTES | |
| | LAB. | PROD. | VENTAJAS | | | |
| Silicio Monocristalino | 19.1 | 12 a 14 | <ul style="list-style-type: none">Tecnología bien desarrollada y probada.Estable.Mayor eficiencia.Se fabrica en celdas cuadradas | <ul style="list-style-type: none">Emplea mucho material caro.Mucho desperdicio (casi la mitad)Manufactura costosa | Siemens (Alemania) Solec (USA) Solarex (USA) Tidelands (USA) CEL (India) Hoxan (Japón) PB Solar (UK) Pragma (Italia) Ansaldi (Italia) Nippon Elec. (Japón) | Sharp (Japón) Helios (Italia) Hitachi (Japón) Mitsubishi (Japón) Kyocera (Japón) Heliodynámica (Brasil) Bharat (India) Isofotón (España) Komatsu (Japón) |
| Silicio Policristalino | 18 | 11 a 13 | <ul style="list-style-type: none">Tecnología bien desarrollada y probadaEstableBuena eficienciaCeldas CuadradasMenos costoso que el monocristal | <ul style="list-style-type: none">Material CostosoMucho desperdicioManufactura costosaMenor eficiencia que el monocristal | Solarex (USA) Pragma (Italia) Photowatt (Francia) AEG (Alemania) Kyocera (Japón) | |
| Silicio amorfo | 15 | 11 a 13.5 | <ul style="list-style-type: none">No requiere rebanadoMenos material desperdiciadoPotencial para rapidez de manufacturaBuena Eficiencia | <ul style="list-style-type: none">Complejidad en el crecimiento del cristal | ASE (USA) Westinghouse (USA) | |

Tabla 2. Cuadro fabricación de la tecnología fotovoltaica.

Tipos de producción de energía eléctrica

Existen diferentes modalidades de agrupación de los sistemas fotovoltaicos. Así puede distinguirse entre sistemas aislados, de gran utilidad en zonas de difícil acceso y a las cuales resulta imposible hacer llegar el tendido eléctrico, sistemas de conexión a red y finalmente, sistemas híbridos.

• Sistemas aislados

Los sistemas fotovoltaicos aislados, pese a su reciente aparición, se han convertido en una fuente de energía insustituible en multitud de aplicaciones,



como puede ser su empleo en satélites artificiales, señales de tráfico, letreros luminosos de carretera, etc.... Pero sobre todo, es en entornos aislados, donde se requiere poca potencia eléctrica y el acceso a la red es difícil, como estaciones meteorológicas o repetidores de comunicaciones, donde se emplean las placas fotovoltaicas como una alternativa económica viable.

Para comprender la importancia de ésta tecnología conviene señalar que aproximadamente el 25 % de la población mundial no tiene acceso a la energía eléctrica, a pesar del hecho de que al menos, en un futuro próximo, tampoco tendrían fácil acceso a ésta tecnología por suponer costes sensiblemente elevados.

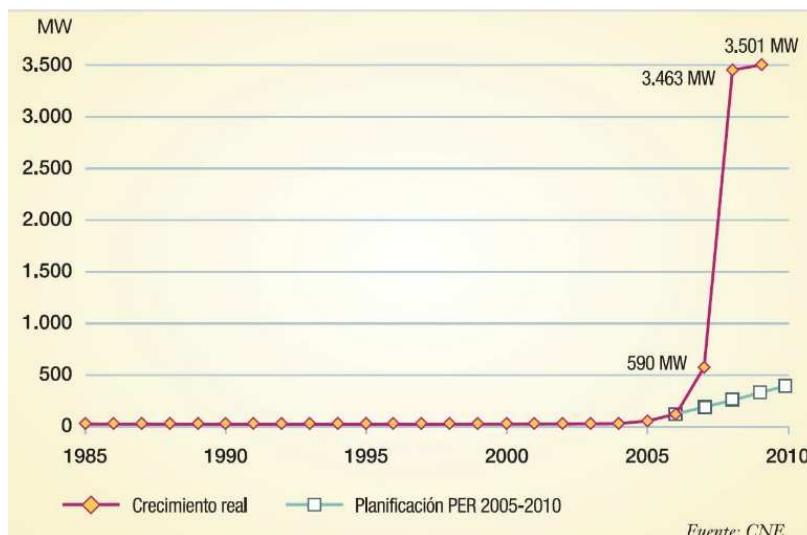
- **Sistemas de conexión a red**

Un sistema fotovoltaico conectado a la red consiste básicamente en un generador fotovoltaico acoplado a un inversor que opera en paralelo con la red eléctrica convencional. El concepto de inyección a red tiene un amplio margen de aplicaciones, desde pequeños sistemas que generan unos pocos kilovatios de potencia instalada hasta centrales generadoras de varios megavatios.

El generador fotovoltaico capta la radiación solar y la transforma en energía eléctrica, que en lugar de ser almacenada en baterías, como en los sistemas aislados e híbridos, se puede utilizar directamente en el consumo o entregarla a la red eléctrica de distribución. Estas dos funciones las realiza un inversor de corriente continua a corriente alterna especialmente diseñado para esta aplicación.

A nivel mundial la potencia de instalaciones fotovoltaicas conectadas a red prácticamente se duplica cada año desde 1998; como ejemplo, de 120 MW instalados en el 2000 la potencia creció hasta 200 MW en el 2001. Esta tendencia se ha mantenido y se ha venido ampliando hasta el año 2011 [32].

A continuación, se va a mostrar un gráfico con la evolución de la potencia instalada directamente conectada a red hasta el año 2010 [33].



Gráfica 2. Potencia instalada en sistemas de conexión a red en los últimos años.

- **Sistemas fotovoltaicos híbridos**

Los sistemas hibridados combinan distintos sistemas de producción de electricidad y almacenamiento para suministrar energía eléctrica. De éste modo, al sistema solar fotovoltaico le pueden ser añadidos motores generadores convencionales, generadores eólicos, pequeñas centrales hidráulicas, y cualquier otra fuente de generación de energía aprovechando en conjunto todos los recursos renovables de una zona.



Ciertos recursos de energía renovable presentan la peculiaridad de complementarse. Así ocurre con la luz solar y con el viento. Es muy alta la probabilidad de que, en aquellos instantes en los que dispongamos de poca o ninguna luz solar, dispongamos de un mayor recurso eólico, y viceversa. Este sistema es ideal para aplicaciones destinadas a zonas rurales.

Una modalidad muy extendida a lo largo de todo el mundo en sistemas de hibridación es el sistema constituido de una central solar fotovoltaica, una central eólica y motor diesel convencional.

El sistema de hibridación de central solar, generador eólico y motor diesel y baterías ofrece numerosas ventajas, entre las cuales gozan de mayor importancia tales como el hecho que los costes de construcción suelen ser una pequeña parte de aquellos que se requieren para realizar una extensión de la red eléctrica, y los gastos de mantenimiento y el combustible son bastante inferiores que los que tendría un generador diesel funcionando solo.

Por otro lado, el sistema de hibridación suele tener, por si mismo una elevada capacidad de generación eléctrica, aportando así energía a mayor número de hogares y negocios. Además, es necesario señalar que éste sistema presenta una fiabilidad mucho más elevada que un generador diesel funcionando solo, debido a que incluye diversos sistemas de generación eléctrica de apoyo y un banco de baterías más grande.



En un sistema de este tipo, la central solar genera energía eléctrica durante el día, y las turbinas eólicas cargan las baterías siempre que sopla el viento (el viento, usualmente es más fuerte de noche). Si se produjese una serie de días consecutivos de muy alta nubosidad y con muy poco viento, o si la demanda de energía eléctrica aumentase por encima de lo usual, el generador diesel entraría a funcionar para apoyar al sistema y así poder suministrar la demanda.

Centrales de energía solar fotovoltaica [34]

La mayor central de energía solar fotovoltaica del mundo hasta el año 2004 se encontraba en la ciudad de Espenhain, cerca de Leipzig. Con 33.500 paneles solares modulares monocristalinos y una capacidad de producción de 5 MW la central era suficiente para abastecer a 1.800 hogares. La inversión ascendió a 20 millones de euros, según Shell Solar y Geosol, las firmas constructoras [35].

Actualmente la empresa alemana SAG Solarstrom [36], que opera en España con el nombre TAU Solar, ha construido la mayor huerta solar del mundo en Erlasee(Alemania). Esta sustituye a la central de Espenhain. La nueva central de Erlasee cuenta en su totalidad con una capacidad de producción de 12 MW.

En junio de 2008, General Motors [37] comunicó de forma oficial sus intenciones de construir la mayor planta de energía fotovoltaica sobre techo del mundo en Figueruelas (Zaragoza), con una extensión de 183.000 metros cuadrados y 50 millones de euros de inversión. En el proyecto colaboran la Comunidad de Aragón, la

empresa francesa Veolia Environnement [38] y el grupo estadounidense Clairvoyant Energy [39].

El mayor fabricante europeo de productos fotovoltaicos es la compañía alemana RWE SCHOTT Solar [40] con sede en Alzenau (Baviera). Esta compañía posee la planta de producción fotovoltaica más moderna y completamente integrada del mundo. En 2003 la compañía generó ventas netas de 123 millones de euros y tiene más de 800 empleados.

Según datos facilitados por la Asociación de Industria Fotovoltaica (Asif) [41] España ha pasado de 22 MW de potencia fotovoltaica instalada en 2004, a más de 1.100 MW en agosto de 2008, pasando de las 3.208 instalaciones que había en 2004, a las 26.000 existentes en 2008.



Figura 21. Central solar fotovoltaica.



Plantas de concentración fotovoltaica [34]

Un paso adelante en las plantas fotovoltaicas son las que utilizan una tecnología de concentración para maximizar la energía solar recibida por la instalación. Las instalaciones de concentración fotovoltaica se sitúan en emplazamientos de alta irradiación solar directa, como son los países a ambas riberas del Mediterráneo, Australia, EE.UU., China, Sudáfrica, México...

Hasta el año 2006 estas tecnologías formaban parte del ámbito de investigación, pero en los últimos años se han puesto en marcha instalaciones de gran tamaño como la de ISFOC(Instituto de Sistemas Solares Fotovoltaicos de Concentración) [42] en Puertollano, Castilla La Mancha, con 3 MW suministrando electricidad a la red eléctrica.

La idea básica de la concentración fotovoltaica es la sustitución de material semiconductor por material reflectante o refractante (más barato). El grado de concentración puede alcanzar un factor de 1000, de tal modo que, dada la pequeña superficie de célula solar empleada, se puede utilizar la tecnología más eficiente (triple unión, por ejemplo). En revancha, el sistema óptico introduce un factor de pérdidas que hace recuperar menos radiación que la fotovoltaica plana. Esto, unido a la elevada precisión de los sistemas de seguimiento, constituye la principal barrera a resolver por la tecnología de concentración.



Figura 22. Planta de concentración solar fotovoltaica en Latinoamérica.

Potencia instalada y producción [34]

España es en la actualidad, uno de los países con más potencia fotovoltaica del mundo, según la Agencia Internacional de la Energía (AIE) [43], con una potencia acumulada instalada de 3.523 MW. Tan solo en 2008 la potencia instalada en España fue de unos 2.500 MW, debido al anuncio de cambio de regulación a la baja de las primas a la generación que finalmente se produjo en septiembre de ese mismo año.

Por otro lado, Alemania es actualmente el segundo fabricante mundial de paneles solares fotovoltaicos tras Japón, con cerca de 5 millones de metros cuadrados de paneles solares, a pesar del hecho de que la energía generada mediante los mismos, tan solo representa el 0,03% de su producción energética total.

La venta de paneles fotovoltaicos ha crecido en el mundo a un ritmo anual del 20% desde el año 1990. En la UE el crecimiento medio anual es del 30%. De este modo, se hace necesario resaltar que el crecimiento actual de las instalaciones solares fotovoltaicas está limitado por la falta de materia prima en el mercado (silicio apto para



aplicaciones solares) al estar copadas las fuentes actuales, aunque a partir de la segunda mitad de 2008 el precio del silicio para aplicaciones solares ha comenzado a disminuir al aumentar su oferta debido a la entrada en escena de nuevos productores.

La inyección en red de la energía solar fotovoltaica, estaba regulada por el Gobierno Español mediante el RD 661/2007 con el 575 % del valor del kilowatio-hora (kWh) normal, lo que se correspondía con unos 0,44 Euros por cada kWh que se inyectaba en red. A partir del 30 de septiembre de 2008 esta actividad está regulada mediante el RD 1578/2008 de retribución fotovoltaica que establece unas primas variables en función de la ubicación de la instalación (suelo: 0,32 Euros/kWh o tejado: 0,34 Euros/kWh), estando sujetas además a un cupo máximo de potencia anual instalada a partir de 2009 que se adaptará año a año en función del comportamiento del mercado.

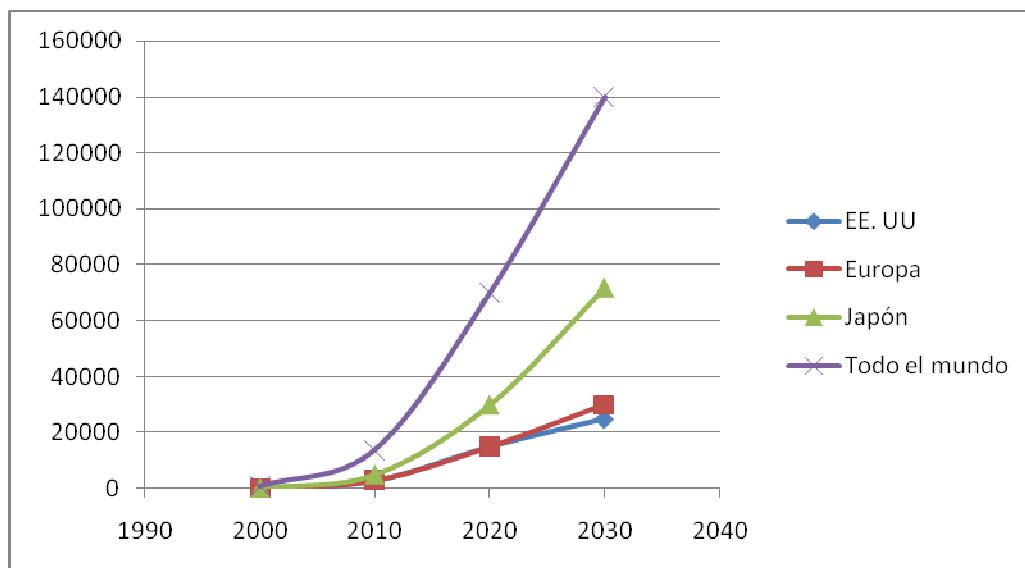
Actualmente, el acceso a la red eléctrica en España requiere una serie de permisos de la administración y la autorización de la compañía eléctrica distribuidora de la zona. Esta tiene la obligación de dar punto de enganche o conexión a la red eléctrica, pero en la práctica el papeleo y la reticencia de las eléctricas están frenando el impulso de las energías renovables. Las eléctricas buscan motivos técnicos como la saturación de la red para controlar sus intereses en otras fuentes energéticas y con la intención de bloquear la iniciativa de los pequeños productores de energía solar fotovoltaica.

Esta situación provoca una grave contradicción entre los objetivos de la Unión Europea para impulsar las energías limpias y la realidad de una escasa liberalización en España del sector energético que impide el despegue y la libre competitividad de las energías renovables.

A continuación, se muestra la evolución que se prevé hasta el año 2030 de la potencia instalada en diferentes zonas del mundo, tanto por medio de una tabla donde se recogen los valores principales como mediante un gráfico de carácter más intuitivo y en el cual se aprecian mucho mejor las diferencias existentes en él [32].

| POTENCIA (MW) | | AÑO | | | |
|---------------|---------------|------|-------|-------|--------|
| | | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 |
| ZONA | EE. UU | 140 | 3000 | 15000 | 25000 |
| | Europa | 150 | 3000 | 15000 | 30000 |
| | Japón | 250 | 5000 | 30000 | 72000 |
| | Todo el mundo | 1000 | 14000 | 70000 | 140000 |

Tabla 3. Evolución de la potencia fotovoltaica instalada.



Gráfica 3. Evolución de la potencia fotovoltaica instalada.



Situación de España en el año 2011 [34]

Por último, resulta prácticamente imposible no mencionar la situación actual, tanto jurídica como económica que afronta España en cuanto a tecnología en sistemas fotovoltaicos se refiere.

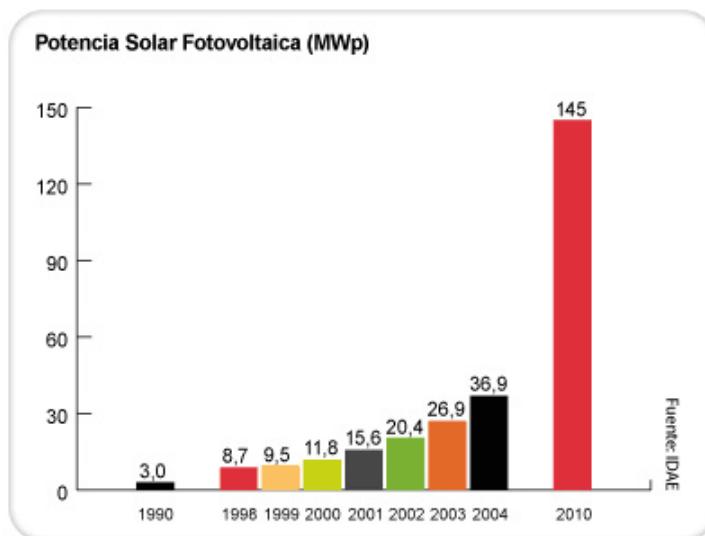
Así pues, se hace necesario mencionar el hecho de que las dos últimas normas emanadas por el Gobierno y, después de agrias disputas en el Congreso de los Diputados, luego en el Senado, vuelta otra vez al Congreso ratificándose, en definitiva, por los partidos políticos PSOE, PNV y CiU han hecho que las expectativas económicas de los productores de energía eléctrica fotovoltaica se hayan reducido en un 30 %.

La situación anterior a estas medidas se regía por el RD 661/2007 y por el RD 1578/2008 de 26 de septiembre en el que se prometía una cantidad primada por cada kWh producido durante 25 años para, después, dar otra cantidad primada hasta la terminación de la vida útil de la instalación.

Tras muchas e intensas gestiones el Gobierno elaboró dos normas, una que limitaba la percepción de primas hasta el límite del año 25 (RD 1565/2010, de 19 de noviembre) y la última, que fue publicada el 24 de diciembre de 2010, en la que se limitaba el número de horas susceptibles de pago, llegando a establecerse un recorte de un 30 % sobre lo prometido anteriormente. Se hizo mediante un Real Decreto Ley (el 14/2010 de 24 de diciembre) por lo que se impide su tramitación en los juzgados de forma directa al no poderse utilizar la vía del recurso de inconstitucionalidad de forma directa por los administrados.

Sí, en cambio, quedan medidas como las efectuadas por fondos de inversión europeos mediante un arbitraje, recurso de inconstitucionalidad por parte del Gobierno de Murcia y manifestaciones vertidas por el Sr Günther Oettinger, comisionario europeo de la energía, en el sentido de no querer tolerar medidas retroactivas que, por su naturaleza, conllevan un fenómeno de inseguridad jurídica que hace quebrar para el extranjero la confianza en el mercado español.

Por último se ha creído conveniente la presentación de un gráfico en el cual se muestra la evolución de la potencia instalada en España, hasta el año 2010



Gráfica 4. Evolución potencia solar fotovoltaica instalada en España.



Ventajas e inconvenientes

El empleo de la tecnología fotovoltaica para la generación de energía eléctrica constituye una serie tanto de ventajas que favorecen su uso y las convierten en tecnologías con un elevado potencial para sustituir a los sistemas de producción de energía a partir de fuentes de energía no renovables, como ciertos inconvenientes que resulta interesante analizar para tener mayor conciencia de la necesidad o no de su implementación en la producción general de energía.

• Ventajas:

Así pues, la implementación de la tecnología fotovoltaica para la generación de energía eléctrica, supone una serie de ventajas que van a ser analizadas a continuación:

- Se trata de un sistema de producción de energía no contaminante, esto es, produce cero emisiones de CO₂ así como de otros gases, a la atmósfera.
- No consume ningún tipo de combustible, contribuyendo de éste modo al modelo de desarrollo económico sostenible mediante el empleo de fuentes inagotables de energía, que confieren a las regiones que se abastecen de las mismas de cierta independencia de los países exportadores de combustibles. No genera ningún tipo de ruido.
- Se trata de dispositivos cuya instalación resulta ser relativamente simple y con un mantenimiento muy reducido, presentando una viabilidad media de 30 años.



- Permite la venta de excedentes de energía eléctrica a la red general lo que supone un volumen de ingresos adicional para el propietario del panel fotovoltaico.
- Permite el aumento de potencia mediante la adición de paneles fotovoltaicos. Esto es posible gracias al diseño modular que caracteriza ésta tecnología.

- **Inconvenientes:**

Del mismo modo en que se han analizado las ventajas derivadas del empleo de ésta tecnología resulta igualmente interesante el análisis de los inconvenientes que puede representar su uso y desarrollo.

- Así pues, puede resumirse que su principal inconveniente reside en el hecho de ser una tecnología relativamente cara, suponiendo, tal y como se ha explicado anteriormente, una inversión inicial para la instalación de la misma en un hogar de una familia europea de 30.000 Euros, inversión que resulta excesivamente elevada si para un uso doméstico es requerida.



5. 1. 2.- Energía solar térmica

Introducción

La energía solar térmica, o energía termosolar, se define como el aprovechamiento de la energía procedente del Sol para generar calor mediante el uso de colectores o paneles solares térmicos.

Esta agua a la cual se le ha aumentado la temperatura, podrá ser usada posteriormente para la producción de energía mecánica y, a partir de ésta última, de energía eléctrica. Otras aplicaciones para las que puede ser usada el agua a alta temperatura obtenida son la producción de agua caliente destinada al consumo de agua doméstico, ya sea Agua Caliente Sanitaria (ACS) o calefacción. Actualmente también existe la posibilidad, mediante el calor absorbido de la radiación solar, de alimentar una máquina de refrigeración por absorción, técnica que empleará esta energía solar térmica en lugar de electricidad para producir frío, del mismo modo en que lo hace un aparato de aire acondicionado tradicional.

Resulta también muy interesante, y a pesar de que se explicará más adelante, hacer aquí una breve diferenciación entre la energía solar térmica de alta concentración y la energía solar térmica de baja concentración. Los sistemas de alta concentración son dispositivos que concentran la radiación solar en un punto, alcanzando temperaturas de hasta 1000 °C. Dentro de los sistemas de alta concentración pueden distinguirse las centrales de torre y los dispositivos de disco parabólico. Por otro lado, los sistemas de baja concentración son dispositivos que concentran la radiación solar en una línea focal, dando lugar a temperaturas mucho más bajas, en torno a los 40 – 50 °C, no debiendo



superar nunca los 80 °C. Dentro de los sistemas de baja concentración pueden distinguirse los colectores cilíndrico – parabólicos.

Elementos constituyentes

En el siguiente apartado, se van a analizar de modo superficial algunos de los diferentes elementos constituyentes presentes en una instalación solar térmica. Se estudiará con más detalle la función específica de cada uno en los diferentes apartados destinados a éste fin. Esto es debido a que existen variaciones importantes en cuanto a componentes dependiendo de la tecnología empleada, ya sea centrales de torre, colectores cilíndrico – parabólicos o tecnología de disco Stirling, tecnología de disco parabólico.

Así pues, a excepción del captador, elemento constituyente común a las tres tecnologías, el resto de elementos sólo podrán encontrarse en centrales de torre y en centrales con colectores cilíndrico – parabólicos.

- **Captador:**

Los captadores solares, son los elementos encargados de absorber la radiación solar y concentrarla en un punto o en una línea, dependiendo de la tecnología empleada. Más adelante, y debido a ser uno de los elementos constituyentes más importantes y común a todas las tecnologías de aprovechamiento de la energía termosolar se estudiarán estos elementos en profundidad.



- **Círculo primario:**

El circuito primario, se trata de un circuito cerrado, encargado del transporte de calor desde el captador hasta el acumulador (sistema que almacena calor). El líquido calentado (agua o una mezcla de sustancias que transportan el calor) lleva el calor hasta el acumulador. Una vez enfriado, vuelve al colector para volver a calentar, y así sucesivamente.

- **Acumulador:**

El acumulador es un depósito donde se acumula el fluido de trabajo calentado útil para la generación de electricidad.

- **Intercambiador de calor:**

El intercambiador de calor aumenta la temperatura del agua situada en la caldera con el objetivo de producir vapor, que será el encargado de mover la turbina. El intercambiador de calor, presenta una forma con motivos sinuosos, de modo que se consigue aumentar la superficie de contacto y por lo tanto, la eficiencia.

- **Círculo secundario:**

El circuito secundario es el encargado de conducir el vapor de agua generado en la caldera hasta la turbina, en la cual desarrollará una energía mecánica que gracias a un alternador se transformará en energía eléctrica.



- **Caldera:**

En la caldera se encuentra el agua, que una vez absorba el calor procedente del intercambiador se transformará en vapor y será conducido hasta la turbina donde se encargará junto con el alternador, de producir energía eléctrica.

- **Alternador:**

Es el encargado de transformar la energía mecánica obtenida mediante el giro en la turbina en energía eléctrica.

- **Bombas:**

Las bombas, presentes en caso de que la instalación sea de circulación forzada, son de tipo recirculación (suele haber dos por circuito), trabajando una la primera mitad del día, y la otra, la otra mitad restante. Esta característica, favorece el hecho que las bombas puedan alargar durante más el tiempo de funcionamiento sin tener que hacer ningún tipo de mantenimiento previo.

Así pues, en una instalación de energía termosolar, suele ser común la existencia de 4 bombas, dos en cada circuito. Dos en el circuito primario que bombean el agua de los colectores y las otras dos en el circuito secundario que bombean el agua de los acumuladores, en el caso de una instalación de tipo circulación forzada, como ya se ha comentado anteriormente.



- **Tuberías:**

Las tuberías de la instalación se encuentran recubiertas de un aislante térmico para evitar pérdidas de calor con el entorno. Son las encargadas de conducir el, o los fluidos, hacia los diferentes componentes y las diferentes zonas de que constan éste tipo de dispositivos.

- **Panel de control:**

Se dispone también de un panel principal de control en la instalación, donde se muestran las temperaturas en cada instante (un regulador térmico), de manera que pueda controlarse el funcionamiento del sistema en cualquier momento.

Captadores solares

Entre los distintos tipos de captadores que existen actualmente pueden distinguirse los conocidos como de placa plana, los de tubos de vacío (tubos de vidrio) y por último, los de tubos de vacío por cambio de fase. En primer lugar, y antes de pasar al desarrollo de cada uno de los tipos de captadores se va a proceder a la explicación de cada una de sus partes constituyentes, para posteriormente, estar en condiciones de comprender con mayor claridad las diferencias existentes entre unos y otros. Así pues, entre los distintos componentes que constituyen un captador, se puede distinguir:

- **Cubierta:**

Puede estar presente o no. Generalmente es de vidrio aunque también son utilizados otros materiales como componentes plásticos, ya que es un material



menos caro y más manejable. Su función es minimizar las pérdidas por convección y radiación y por eso debe presentar una transmitancia solar lo más alta posible, es decir, debe ser capaz de absorber la mayor cantidad de calor por unidad de tiempo.

- **Canal de aire:**

Supone un espacio, vacío o no, situado entre la cubierta y la placa absorbente. Su espesor será calculado teniendo en cuenta las pérdidas por convección si fuese demasiado ancho y el exceso de temperatura que podría tener lugar si fuese estrecho en exceso.

- **Placa absorbente:**

Elemento que absorbe la energía procedente de la radiación solar y la transmite al fluido contenido en las tuberías del dispositivo. La principal propiedad que caracteriza a éste elemento es su capacidad de absorción térmica solar, así como una disminuida emisión térmica, para evitar las pérdidas de energía térmica por convección.

- **Tubos o conductos:**

Son elementos que suelen estar en contacto, incluso a veces soldados, a la placa absorbente, con el fin de que el intercambio de energía sea lo más eficiente posible, disminuyendo al máximo las pérdidas. Confinado en los tubos se encuentra un fluido, generalmente agua, que recibirá ese calor absorbido y será posteriormente conducido al acumulador.



- **Capa aislante:**

Elemento encargado de recubrir el sistema principal y disminuir al máximo las pérdidas. Para ello será necesario que el material aislante presente, entre otras características, la menor conductividad térmica posible.

A continuación, se va a proceder a distinguir entre los diferentes tipos de captadores existentes actualmente, a saber:

- **Captadores solares de placa plana:**

Sistema constituido fundamentalmente por un entramado vertical reticular de tubos encargados de conducir el fluido, generalmente agua, en paralelo, conectados en la zona inferior por un tubo horizontal en la toma de agua fría y por la zona superior por otro tubo similar que constituye la vía de retorno. El entramado de tubos viene encajado en una cubierta, como la descrita unas líneas más arriba, normalmente con doble capa de vidrio en la zona anterior y aislante en su zona posterior.

- **Captadores solares de tubos de vacío (tubos de vidrio):**

Sistema similar al precedente. En éste caso, los tubos metálicos, han sido sustituidos por tubos de vidrio encapsulados, de uno en uno, en otro tubo de vidrio entre los que se hace el vacío como aislamiento. Las grandes ventajas que representa éste tipo de captadores son su alto rendimiento y que, en caso de que uno de los tubos se averíe, no es necesario cambiar el panel por otro nuevo, si no que sería suficiente con la sustitución del conducto afectado. Por el contrario, éste tipo de captadores suponen una inversión económica mayor.



- **Captadores solares de tubo de vacío por cambio de fase:**

Este sistema aprovecha el cambio de fase del fluido, de vapor a líquido, que tiene lugar dentro de cada uno de los tubos, para transmitir la energía calorífica a un segundo fluido de transporte. Los elementos constituyentes son tubos cerrados, generalmente de cobre, que contienen el líquido que, al aumentar su temperatura debido a la incidencia de la radiación solar, hierve y se evapora, de modo que asciende a la zona superior, donde hay un cabezal más ancho, conocida como zona de condensación, y en cuya parte exterior, se sitúa el líquido transportador, que encontrándose a una temperatura inferior a la del vapor del tubo, capta el calor y provoca que el vapor condense y caiga en la parte inferior del tubo para volver a comenzar el ciclo.

El líquido del tubo puede ser agua que, habiendo reducido la presión mediante la generación de un vacío parcial, tendrá un punto de ebullición inferior al que presentaría sin la misma, para trabajar incluso con la insolación producida por rayos infrarrojos en caso de nube.

Tipos de producción de la energía eléctrica

La generación de energía eléctrica a partir de la energía térmica generada mediante la absorción de la radiación solar consiste en calentar un fluido, que al evaporarse, mueve una turbina. A partir de ahí, el funcionamiento es similar al de una central de generación eléctrica cualquiera, bien sea nuclear, térmica, hidrodinámica, etc... con la diferencia de que en éste caso, la fuente de energía primaria es el Sol.

Así pues, dos son los métodos que pueden distinguirse en la actualidad para producir energía eléctrica a partir de energía térmica, un primer método de producción de alta concentración y otro de baja concentración. Aquí simplemente van a mencionarse brevemente para ver cuáles son las principales diferencias entre cada uno de ellos para en apartados posteriores estudiar en profundidad cada una de éstas tecnologías por separado.

- **Dispositivos de alta concentración:**

- **Sistemas de receptor central:**

Son los llamados sistemas de receptor central. En éste caso, la radiación solar es captada por medio de un conjunto de espejos curvos (heliostatos), que reflejan la luz del sol concentrándola en un único punto o foco. Las instalaciones de receptor central presentan rendimientos medios globales del 16 – 20 %.



Figura 23. Sistema de torre central

- **Discos parabólicos:**

Otra variedad de centrales solares térmicas de alta concentración son los discos parabólicos, que emplean un motor Stirling para la generación de energía eléctrica. Estos discos son colectores que concentran la radiación solar en un receptor ubicado en el foco de la parábola. Presentan rendimientos medios individuales del 26 %.



Figura 24. Discos parabólicos

- **Dispositivos de baja concentración:**

- **Colectores cilíndrico – parabólicos:**

Conjunto de colectores cilindro parabólicos que se mueven con el sol concentrando la radiación en una tubería ubicada a lo largo del foco, la cual concentra el fluido de trabajo que transporta el calor adquirido. El fluido que se mueve por el tubo es calentado y transportado a una red de tuberías diseñada para minimizar las pérdidas de calor.



Figura 25. Colectores cilindro parabólicos

Tanto en sistemas de alta o baja concentración, la energía calorífica solar se transforma generalmente en energía eléctrica, aunque existe la posibilidad de almacenar calor.

Centrales térmicas solares

Las diferentes variantes de centrales térmicas solares, así como su metodología de funcionamiento, componentes, empresas productoras, eficiencias y costos tanto económicos como materiales, serán desarrollados en los apartados siguientes, por tanto se ha creído conveniente realizar aquí una muy breve descripción de las mismas para por fin, en los siguientes apartados entrar a desarrollar ambos temas con total dedicación.

Una central térmica solar o central termosolar consiste en una instalación industrial en la que, a partir del calentamiento de un fluido mediante la absorción de la radiación solar y su uso en un ciclo termodinámico convencional, se está en condiciones



de generar la potencia necesaria para, mediante el empleo de un alternador, generar energía eléctrica, del mismo modo en que se genera en una central térmica clásica.

Constructivamente, resulta necesario concentrar la radiación solar para que se puedan alcanzar temperaturas elevadas comprendidas entre los 300 ° C y los 1000 ° C, para poder obtener así un rendimiento aceptable en el ciclo termodinámico, que no podría ser obtenido con temperaturas más bajas.

Los fluidos y ciclos termodinámicos escogidos en las configuraciones experimentales que se han ensayado, así como los motores que implican, son variados, y van desde el ciclo Rankine (centrales nucleares, térmicas de carbón) hasta el ciclo Brayton (centrales de gas natural) pasando por muchas otras variedades como el motor de Stirling, siendo las más utilizadas las que combinan la energía termosolar con el gas natural.

Así pues, pueden distinguirse dos variantes principales de centrales térmicas solares, centrales de torre, también conocidas como sistema de receptor central o centrales de cilindro parabólico. Ambas centran su trabajo en refractar los rayos procedentes de la radiación solar concentrándolos en un punto focal o en una línea focal, lugar donde se encuentra el receptor.

El receptor es el encargado de recibir toda esa radiación calorífica concentrada y transmitirla mediante el intercambiador al fluido de trabajo, el cual, y tratándose de agua se evapora y mueve una turbina que es la encargada de generar la corriente eléctrica mediante la intervención de un alternador y otros dispositivos necesarios, o

bien si se trata de cualquier otro fluido de trabajo, como puede ser aire, sodio fundido o sales fundidas, éste transporta el calor a un generador de vapor y será por fin éste último el encargado de mover la turbina que al igual que en el caso anterior será la encargada de generar la corriente eléctrica mediante diversos dispositivos.



Figura 26. Centrales termosolares de torre central y cilindros parabólicos

Plantaciones térmicas solares

Del mismo modo, la tecnología empleada en las plantaciones térmicas solares, conocida como tecnología de disco Stirling, será desarrollada con total profundidad en un apartado venidero en concreto. Por tanto, aquí simplemente se va a tratar de conferir una idea general de su funcionamiento y prestaciones.

Así pues, del mismo modo que en las plantaciones fotovoltaicas podían encontrarse paneles fotovoltaicos encargados de recibir la radiación solar y transformarla mediante diversos dispositivos en energía eléctrica, en las plantaciones térmicas solares, pueden encontrarse dispositivos de disco Stirling.

Un dispositivo de disco Stirling, tal y como ya se ha comentado anteriormente, consta de un disco parabólico con movimiento según dos ejes y que rastrea el movimiento del sol, que concentra la radiación solar en un punto en concreto, el foco,

en el cual se encuentra la zona caliente del motor Stirling y a la cual es necesario aumentar su temperatura para el funcionamiento del mismo.

Gracias a ese aumento de temperatura producido en el foco caliente, el motor Stirling puede trabajar y mediante la transformación del movimiento de salida recogido en el cigüeñal del mismo puede obtenerse energía eléctrica.

Por último, y tal y como se ha comentado anteriormente y se desarrollará más adelante en profundidad, resulta interesante mencionar algunas de las propiedades que presentan éste tipo de dispositivos, como pueden ser el hecho de ser los dispositivos con la mayor eficiencia conseguida en la actualidad para éste tipo de mecanismos, presentando así ratios de concentración de entre 600 a 2000, pudiendo alcanzar temperaturas superiores a los 1500 °C en el foco.



Figura 27. Plantación térmica solar de dispositivos de disco Stirling



Ventajas e inconvenientes

El empleo de ésta tecnología para las diferentes aplicaciones ya mencionadas supone una serie de ventajas e inconvenientes, que van a ser analizados a continuación para una mejor comprensión de la tecnología y de las posibilidades que representa.

- **Ventajas:**

Los sistemas de generación de energía a partir del aprovechamiento de la radiación solar son fuente de numerosas ventajas, algunas de las cuales van a ser puestas de manifiesto a continuación:

- Los sistemas pueden suponer ahorros en la generación de agua caliente en torno al 75 % [44] respecto a los sistemas actuales de preparación de la misma.
- Los equipos para aprovechamiento térmico de la energía solar constituyen un desarrollo tecnológico fiable y rentable para la producción de agua caliente sanitaria en las viviendas. La inversión en paneles solares, además, puede ser amortizada con el ahorro que se obtiene.
- Las placas solares pueden ser un complemento interesante de apoyo a la calefacción, sobre todo en sistemas que utilicen agua a temperatura inferior a 60°C.



- **Inconvenientes:**

Del mismo modo, el empleo de ésta tecnología presenta también y notable inconveniente que va a ser citado a continuación:

- Su discontinuidad en el tiempo. Ya que la producción óptima de energía se produce gracias a la radiación directa del Sol. Por lo tanto se trata de una producción de energía dependiente de las condiciones atmosféricas, lo que supone, por tanto, cierta incertidumbre en torno a la eficiencia de su funcionamiento.

Sin embargo, con el objetivo de solventar éste problema derivado del empleo de éste tipo de dispositivos, se dispone de sistemas de almacenamiento de la energía generada, ya comentados en líneas anteriores, para poder ser empleada en cualquiera de éstas situaciones en las cuales el funcionamiento y generación de la misma no resulta ser el óptimo.

5. 1. 3.- Comparativa

De éste modo, y una vez analizados los desarrollos más en profundidad de cada una de éstas dos tecnologías se está en condiciones de establecer una comparativa entre una y otra que facilite comprender las diferencias existentes entre las mismas, tales como la capacidad de decisión entre una y otra en función del objetivo que se quiera conseguir, los medios disponibles y el lugar el implementación de la misma.

Ambas tecnologías tienen en común el no empleo de combustibles fósiles y la no generación de ningún tipo de residuos así como la dependencia que presentan de las condiciones atmosféricas para su funcionamiento.



Sin embargo, el empleo de paneles fotovoltaicos resulta especialmente útil cuando se trata del abastecimiento de zonas rurales situadas en lugares de difícil acceso o electrificación de dispositivos como señales de tráfico, marítimas, etc.... mientras que, en principio, no resulta ser una tecnología del todo competitiva para aplicaciones domésticas en núcleos urbanos relativamente grandes.

Esto es debido a que aunque sí suponen un ahorro económico sustancial precisan de una inversión inicial demasiado elevada como para resultar rentable su instalación.

Es en éste punto, en la generación en poblaciones rurales aisladas, donde la tecnología de disco Stirling podría plantearse como una alternativa viable a la tecnología fotovoltaica, tal y como se desarrollará más adelante, debido a presentar unos valores de eficiencia sensiblemente más elevados, situados en torno al 26 % y una menor dependencia de las condiciones atmosféricas, gracias a técnicas de almacenamiento e hibridación.

Por otro lado, la tecnología empleada en centrales de torre o de colectores cilíndrico parabólicos puede considerarse más interesante en cuanto a la generación de energía eléctrica a gran escala, destinada a ser exportada a la red general de distribución se refiere. Esto es debido por un lado a la mayor eficiencia que presentan los sistemas empleados mediante ésta tecnología, en comparación con los valores que presentan los valores fotovoltaicos, y por otro lado, a la reducción en un 30 % de las primas obtenidas por los propietarios de paneles fotovoltaicos.

De éste modo, los sistemas fotovoltaicos presentan rendimientos en torno al 10 y el 14 %, en función de que sean amorfos, policristalinos o monocristalinos, aumentando conforme lo hace tanto su peso y dimensiones como su costo, mientras que la eficiencia media que presentan las centrales termosolares se sitúa en valores entre el 16 y el 20 %.

Por último, la tecnología basada en el aprovechamiento de la energía solar mediante paneles fotovoltaicos presenta una ventaja sustancial, que comparte con la tecnología de disco Stirling, frente a la tecnología empleada en las centrales de torre y las de cilindro parabólico, y es que la potencia conseguida mediante la instalación puede ser ampliada o reducida cuanto se quiera con la sola adición o sustracción de paneles fotovoltaicos de modo que se puede ir invirtiendo en la plantación paulatinamente según se vaya queriendo aumentar dicha potencia.

5. 2.- Centrales de torre

Dentro de las centrales térmicas solares, que aprovechan la radiación del sol para producir energía eléctrica, pueden distinguirse las centrales de torre, que están constituidas, entre otros, por dos componentes bien diferenciados; por un lado, un conjunto de heliostatos, que reflejan la radiación solar y por el otro una torre que recibe esa radiación.



Figura 28. Central de torre central



5. 2. 1.- Elementos constituyentes

Como ya se ha comentado anteriormente, las centrales de torre están constituidas por varios dispositivos diferentes que van a ser descritos a continuación para poder estar en condiciones, más delante, de comprender con exactitud cuál es el funcionamiento de éstas centrales.

- **Heliostato:**

Un heliostato está constituido por un conjunto de espejos que, gracias a la intervención de un mecanismo servomotor controlado por ordenador, son capaces de orientarse según movimientos en torno a dos ejes siguiendo la trayectoria descrita por el Sol durante su ciclo diurno, de un modo tal, que pueda ser maximizada la energía térmica procedente del Sol reflejada por los mismos. Se están realizando estudios acerca de los sistemas de control de estos dispositivos, con el fin de disminuir al máximo los costes totales de la planta y optimizar de la mejor manera posible la cantidad de radiación solar reflejada, y por tanto, aprovechada.

Por otro lado, el tamaño de un heliostato oscila entre los 40 m² y los 150 m², sin embargo, en la actualidad, se está comenzando a investigar acerca de la conveniencia de la sustitución de éstos de gran tamaño por heliostatos que presenten una superficie máxima en torno a 1 m² [45].

Así pues, el cometido primordial de los heliostatos consiste en reflejar la radiación solar que incide sobre ellos, siendo capaces, por otro lado, de reflejar



el 80 % de la radiación que reciben, en un punto situado en la zona más alta de una torre, en la cual suele encontrarse el receptor.

- **Torre:**

La torre constituye un elemento de gran envergadura, alcanzando altura superiores incluso a los 100 m, en torno al cual se sitúan los heliostatos y en cuya cima se encuentra instalado el receptor.

- **Receptor:**

Uno de los componentes más críticos de las centrales de torre es el receptor, situado en lo alto de la misma, y sobre el cual, son reflejados por los heliostatos, los rayos procedentes de la radiación solar. Debido a las altas temperaturas, llegado a los 1000 °C incluso, y gradientes que puede alcanzar, lo cual está además íntimamente ligado al rendimiento del ciclo termodinámico, los estudios actuales se centran básicamente en la elección de materiales y la disposición de estos de forma que existan las menores pérdidas de calor posibles, incrementando así no sólo la eficiencia global del ciclo sino la del receptor en sí. Existen receptores volumétricos, de tubos, abiertos, de cavidad, circulares, presurizados, etc.

- **Fluido de trabajo:**

El fluido de trabajo se encuentra en el interior del receptor, y puede ser, entre otros, aire, vapor de agua, sodio fundido o sales fundidas, según la tecnología escogida. En el caso de tratarse de vapor de agua como fluido de trabajo, es éste último el encargado de mover directamente una turbina. En



cualquiera de los casos restantes, el fluido transporta el calor hasta un generador de vapor de agua, con el que se hace funcionar una turbina. Por último, señalar que el empleo de uno u otro fluido determina las presiones de trabajo del sistema, resultando, para vapor saturado una presión de 40 bares, mientras que para un receptor que funciona con sales fundidas es suficiente con una presión de entre 10 y 15 bares. Así mismo, el empleo de uno u otro fluido guarda una relación directa con la eficiencia obtenida en el receptor, como se detallará algunas líneas más adelante.

- **Turbina:**

La turbina, impulsada por el vapor de agua, y conectada directamente a un generador, le confiere a éste último el movimiento necesario para generar energía eléctrica.

- **Generador:**

Se encuentra conectado directamente a la turbina y gracias al movimiento que ésta última le transmite es el encargado de generar la energía eléctrica.

- **Almacenamiento térmico:**

Las centrales solares de torre también poseen un sistema de almacenamiento que permite guardar la energía sobrante para que la producción de electricidad sea de forma continua. Por ejemplo, en el caso de la instalación CESA-I de la Plataforma Solar de Almería se dispone de un sistema de almacenamiento térmico a base de sales fundidas. Más tarde se desarrollará ésta tecnología en un apartado específico para ello.

A continuación se muestra un esquema con la disposición adoptada por los diferentes elementos constituyentes de una central de torre. Algunos de los elementos existentes en el esquema no han sido desarrollados previamente, esto es, por considerarse elementos comunes a cualquier instalación de éste tipo y no presentar un interés especial.

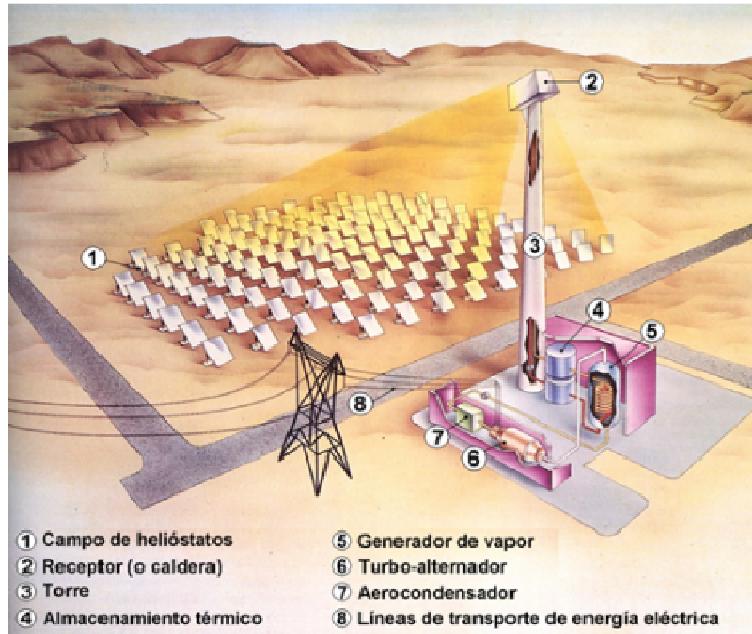


Figura 29. Esquema de la disposición de elementos en una central de torre.

5. 2. 2.- Funcionamiento

Las centrales térmicas de torre presentan numerosas similitudes, en lo que al proceso de producción de la energía eléctrica se refiere, con las centrales térmicas convencionales que emplean combustibles como fuel, gas o carbón. Una vez que se ha producido la interfase que tiene lugar en el receptor, los sistemas subsiguientes son, en mayor o menor medida, los convencionales de una planta térmica de combustible.



De éste modo, los heliostatos reflejan la radiación procedente del Sol en un punto determinado de la torre, generalmente situado en una zona muy próxima a la cima y en el cual se encuentra situado el receptor, como ya se había adelantado con anterioridad.

En el receptor, pueden alcanzarse temperaturas muy elevadas, y en su interior, se sitúa el circuito primario, constituido por un entramado de conductos por los que circula el fluido de trabajo. Tal y como ya se ha explicado, si ese fluido de trabajo es vapor de agua, él mismo es el encargado de producir movimiento en la turbina. Si por el contrario, por el circuito principal discurre aire, sodio fundido o sales fundidas, entonces, el calor absorbido por el fluido en el circuito principal es transferido, a un circuito secundario o caldera, en el cual se encuentra el vapor de agua, y será éste último el encargado de proporcionar el movimiento necesario en la turbina.

Con el movimiento de que se ha dotado a la turbina, y, debido al hecho de estar ésta mecánicamente relacionada con un generador o alternador, será éste último el encargado de transformar ese movimiento rotatorio transmitido energía eléctrica.

5. 2. 3.- Tipos de receptores

De las diversas variantes de receptores existentes y ya mencionadas anteriormente, entre las que destacan los receptores volumétricos, de tubos, abiertos, de cavidad, circulares, presurizados, etc..... pueden distinguirse dos, en concreto, que van a ser analizados a continuación por ser los que pueden encontrarse con mayor frecuencia.



- **Receptor volumétrico abierto:**

En ésta variante de receptor, un soplador transporta el aire del ambiente a través del mismo, el cual es calentado por la luz del sol reflejada. El receptor está compuesto por una malla de alambre, materiales cerámicos o metálicos dando lugar a una estructura en forma de panal, la cual es atravesada por aire que se calienta hasta temperaturas entre los 650°C y 850°C.

En la parte delantera, el aire frío entrante refresca la superficie del receptor. Por lo tanto, la estructura volumétrica produce las temperaturas más altas dentro del receptor, reduciendo las pérdidas por radiación térmica en la superficie del mismo.

Luego, el aire alcanza la caldera, donde es generado el vapor. Un quemador y un sistema de almacenaje termal pueden garantizar la capacidad en este tipo de central eléctrica solar termal.

- **Receptor de aire presurizado:**

El concepto de receptor volumétrico presurizado ofrece nuevas oportunidades a las centrales solares de torre. En éste caso, una bóveda de cristal transparente cubre el receptor y separa el absorbé dor del ambiente.

Un compresor presuriza el aire hasta alcanzar presiones cerca de 15 bares. Dentro del receptor presurizado, el aire se calienta a temperaturas de hasta 1100°C, y el aire caliente acciona una turbina de gas. Esta turbina está conectada con un compresor y un generador, encargado éste último de generar electricidad.



El exceso de calor de la turbina de gas va a una caldera y además impulsa un proceso ciclo de vapor.

El proceso combinado de la turbina de gas y de vapor puede alcanzar eficiencias por encima del 50%, mientras que la eficiencia de un ciclo de turbina de vapor simple es de solamente el 35%. Esto permite obtener sistema solares con eficiencias superiores al 20% [46].

Por otro lado la eficiencia media que presentan éstos dispositivos, los receptores, dependiendo del fluido de trabajo, por ejemplo, en el caso de un receptor de 300 KW / m², resulta ser del 80 % para tecnología de sales fundidas, un 88 % para vapor saturado y un 83 % si se emplea la tecnología de aire atmosférico.

5. 2. 4.- Disposición del campo de heliostatos

La disposición del campo de heliostatos con respecto a la posición de la torre central, atiende a dos consideraciones fundamentalmente, en primer lugar, la latitud en la que se encuentra situada la central objeto de estudio, y en segundo lugar el coste, tanto de construcción como de mantenimiento que presenta la torre central.

Así pues, en la actualidad, pueden encontrarse dos disposiciones diferentes del campo de heliostatos con respecto a la torre central, a saber, disposición en campo Norte y disposición circular en torno a la torre central.

- **Disposición en campo norte:**

En ésta configuración, los heliostatos se encuentran al Norte, con respecto a la posición de la torre. Atendiendo al parámetro de latitud en el cual se encuentre la central, es necesario señalar que cuanto más alejada del ecuador se sitúe la torre, mayor será la eficiencia óptica anual que presenta éste tipo de disposición con respecto a la disposición en campo circular.



Figura 30. Heliostatos según disposición de campo Norte.

- **Disposición circular en torno a la torre central:**

En éste caso, el campo de heliostatos se distribuye de modo más o menos uniforme y circular en torno a una torre central sobre la cual reflejan la radiación del Sol. Debido a que el coste de una torre crece de modo exponencial con su altura y a que la disposición en campo Norte, requiere de torres bastante más altas que la disposición en campo central, para una misma potencia térmica del receptor, cuanto mayor es el campo de ubicación de la central, más interesante resulta la implementación de una distribución según campo circular.



Figura 31. Heliostatos según disposición circular.

De éste modo, la distancia entre los heliostatos tiene que ser tal que se minimicen las sombras y bloqueos que tengan lugar entre ellos, pero no demasiado grande de tal forma que se optimice al máximo la ocupación del terreno disponible para la central eléctrica. Según la posición de los heliostatos dentro del campo, les tendrá que ser aplicados unos determinados coeficientes que tengan en cuenta la disminución del rendimiento por las sombras y los bloqueos, así como por la atenuación de la atmósfera.

Por último, y a modo de ejemplo, para latitudes relativamente próximas al ecuador, como puede ser el caso de España, y, para plantas relativamente pequeñas como pueden ser PS10 O PS20, de 10 y 20 MW de potencia eléctrica respectivamente, pero que prácticamente no cuentan con dispositivos de almacenamiento térmico, la tendencia es elegir una distribución según campos Norte.

Si embargo, para campos mayores, como la Gemasolar de 17 MW, y con 15 horas de almacenamiento, la elección es un campo circular [47].



5. 2. 5.- Primeras plataformas con centrales de torre [48]

Durante finales de los años 1970 y principios de los años 1980 se construyeron varias centrales eléctricas termosolares en distintos lugares del planeta y con diversas variantes tecnológicas, con objeto de demostrar la viabilidad de la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar mediante la conversión térmica.

Se ha creído conveniente, para entender en mayor medida la evolución que ésta tecnología ha experimentado desde sus inicios hasta su situación actual, una breve descripción de algunas de estas primeras centrales eléctricas termosolares mencionada algunas líneas atrás.

- **SSPS / CRS:**

Central de torre fundada en el año 1981 y situada cerca de Tabernas, en Almería. El fluido de trabajo contenido en el receptor era sodio fundido y alcanzaba temperaturas de 520 °C, generando de este modo 0,5 MW de potencia eléctrica con 90 heliostatos distribuidos en una parcela de 3700 m². El sodio fundido, contenido en el circuito primario, se empleaba para generar vapor de agua que a su vez movía un motor Spilling [49] acoplado a un generador eléctrico, encargado de generar la energía eléctrica.

- **Sunshine:**

Situada en Nio, Japón y fundada en el año 1981. El receptor de vapor de agua, generaba 1 MW eléctrico con 12.900 m² de heliostatos. Funcionó durante tres años, demostrando la viabilidad tecnológica del proyecto.



- **Themis:**

La central de torre Themis, situada en Francia, comenzó a ser construida en el año 1979, con un presupuesto inicial de prácticamente 46 millones de euros, y fundada finalmente en el año 1982 y se mantuvo produciendo energía eléctrica entre los años 1983 y 1986.

La central, constituida por 11.800 m² de espejos distribuidos en 201 heliostatos que reflejaban la radiación solar sobre un receptor que trabajaba con sales fundidas y que estaba situado en una torre central de 100 m de altura, era capaz de generar 2.5 MW de potencia eléctrica.

Themis fue parada en su proceso transformador debido a la no rentabilidad de la producción eléctrica que llevaba a cabo, pero ha sido utilizada habitualmente con fines pedagógicos didácticos científicos, por estudiosos astrónomos, para observar, medir y estudiar los rayos gamma en el cosmos y la atmósfera.

Actualmente, existe un proyecto de rehabilitación que contempla reparar la mitad de los heliostatos para desarrollar una energía de 1 MW mediante una turbina de gas instalada en la torre de la central y substituir la otra mitad de los espejos por paneles fotovoltaicos.

- **CESA1:**

Situada en Almería, España y fundada en el año 1983. Presentaba un receptor de vapor de agua que trabajaba a 520 °C y 10 bar de presión, y generaba



1,2 MW eléctricos con 11.900 m² de espejo en 300 heliostatos. Disponía de un sistema de almacenamiento térmico de sales fundidas. El vapor alimentaba directamente una turbina, o se enviaba para calentar las sales fundidas.

- **SPP5:**

Central de torre con origen en el año 1985 y situada en Ucrania. En ésta ocasión se empleó un receptor de vapor de agua, generando así 5 MW de potencia eléctrica mediante el empleo de 40.000 m² de heliostatos.

- **Solar Two;**

Central situada en California, EE. UU y con un periodo de actividad comprendido entre los años 1996 y 1999. Utilizó parte de la infraestructura de Solar One, como la torre central, heliostatos, etc. Presentaba un receptor situado en la zona más alta de la torre, en cuyo interior circulaba el fluido de trabajo, que en éste caso se trataba de sales fundidas, generando, de éste modo 10 MW de potencia eléctrica mediante la implementación de 71.500 m² de heliostatos.

A pesar de resultar ser una tecnología en constante crecimiento, ninguna de las mencionadas empresas continuó desarrollando sus productos ni generando energía eléctrica pasado el año 2002, con la excepción de los proyectos SSPS / CRS y CESA – 1, que si tuvieron una continuidad, no como plataformas generadoras de energía eléctrica, pero si como emplazamientos destinados a la prueba y desarrollo de tecnologías de éste tipo.



5. 2. 6.- Plataformas con centrales de torre en la actualidad

A continuación van a desarrollarse algunas de las plataformas que emplean la tecnología de centrales de torre en la actualidad, describiendo minuciosamente, tanto sus instalaciones como la potencia que son capaces de generar.

PLATAFORMA SOLÚCAR [50]

La Plataforma Solúcar es la mayor plataforma solar de Europa y está situada en el entorno de Sanlúcar la Mayor, Sevilla. En este complejo de plantas Abengoa Solar [50] opera comercialmente 183 megavatios (MW) y tiene una capacidad total prevista de 300 MW a partir de tecnología de torre y colectores cilindro - parabólicos principalmente.

Actualmente, la Plataforma produce anualmente energía suficiente para abastecer a 94.000 hogares, y evita la emisión de más de 114.000 toneladas anuales de CO₂.

El proyecto, ocupa una extensión superior a las 1.000 hectáreas y supondrá la creación de 1.000 puestos de trabajo asociados a la fase de fabricación y construcción, cerca de 300, para la operación de las plantas, y otros 50, relacionados con la investigación y el desarrollo.

Desde que empezó su construcción, la Plataforma Solúcar está potenciando el desarrollo de la industria local y de empresas de servicio y ha supuesto un impulso de la inversión tecnológica en la comarca así como el nacimiento del turismo científico que ha surgido con la puesta en marcha de la PS10, PS20, Solnovas, Sevilla PV y

Casaquemada PV. Además, la plataforma cuenta con un área de investigación y desarrollo donde se encuentran varias plantas de demostración de nuevas tecnologías.

De entre todas las centrales puestas en marcha en la Plataforma Solúcar, se ha creído conveniente el desarrollo aquí de dos de ellas, por trabajar con la tecnología de torre central, ya que el resto de centrales emplean tecnología de colectores de tipo disco parabólico y fotovoltaica.



Figura 32. Plataforma Solúcar

- **PS10 [50] [51]:**

La central termosolar de torre central, PS10, construida por Abengoa Solar en colaboración con el CIEMAT [53] en Sanlúcar la Mayor, Sevilla fue inaugurada oficialmente por el presidente de la junta de Andalucía, Manuel Chaves, en Marzo del año 2007 y lleva produciendo energía eléctrica, que suministra directamente a la red general de distribución desde Febrero del año 2007



Se trata de una central con una disposición según campo Norte, formada por 624 heliostatos, una torre de 125 metros de altura y un receptor de tipo cavidad de 52 MWt de potencia térmica que trabaja con vapor de agua como fluido de transferencia, de modo que es capaz de generar una potencia eléctrica de 11 MW, dando lugar a una producción anual de 24,2 GWh de energía eléctrica, ocupando un campo de en torno a 55 hectáreas. El receptor, formado por cuatro paneles de tubos absorbidores en los que se produce la evaporación inicial del agua de alimentación, se encuentra en la parte alta de la torre central, concretamente a 100,5 m del suelo.

Esta central, tal y como ya se ha comentado, trabaja con agua como fluido de trabajo tanto en el receptor central como en el circuito de potencia, así como en su sistema de almacenamiento, sistema que emplea agua a presión capaz de generar una energía equivalente a la generada por la central durante 50 minutos a media carga.

Se prevé una vida operativa de al menos 25 años para la PS10, resultando ser la primera central de un conjunto de plantas solares que serán construidas hasta el año 2013, entre las que se encontrarán centrales de torre, de cilindro parabólico y mixtas, y con las que se podrá alcanzar una producción total de 300 MWe de potencia eléctrica, suficientes para abastecer a 180.000 hogares, o a toda la ciudad de Sevilla, evitando de este modo la emisión de 600.000 toneladas de CO₂ a la atmósfera.



- **PS20 [50] [52]:**

La central PS20, construida por Abener [54], fue puesta en funcionamiento en Mayo del año 2009. Situada al oeste de la PS10 y constituidas por un campo de 1255 heliostatos, cada uno de 120 m^2 de superficie y diseñados por Abengoa Solar, dispuestos en disposición de campo Norte, una torre de 165 metros de altura y un receptor que trabaja con vapor saturado es capaz de generar una potencia eléctrica de 20 MW, dando lugar a una producción anual de 45 GWh de energía eléctrica, capaces de abastecer de energía eléctrica a 10.000 hogares y evitando así la emisión de 12.000 toneladas de CO₂ anuales a la atmósfera.

De éste modo la PS20, incorpora avances tecnológicos muy importantes, desarrollados por Abengoa Solar, respecto a la primera torre, la PS10, y entre los cuales se pueden destacar el diseño de un receptor con más eficiencia, y diversas mejoras en los sistemas de control y operación, así como en el sistema de almacenamiento térmico de energía.

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERIA (PSA) [55]

La Plataforma Solar de Almería, PSA, cuenta con dos instalaciones excepcionales para el ensayo y validación de componentes y aplicaciones con tecnología de receptor central. Las instalaciones CRS y CESA-1 permiten abordar proyectos y validar tecnologías en un rango de producción desde centenares de kilovatios hasta varios megavatios.



Son por tanto dos laboratorios, situados a la intemperie, especialmente acondicionados para escalar y cualificar sistemas en su fase previa a la etapa de demostración comercial.

- **CESA – 1 [55]:**

El proyecto CESA-I fue promovido por el Ministerio de Industria y Energía de España e inaugurado en el mes de Mayo del año 1983, como ya se ha comentado anteriormente, para demostrar la viabilidad de las plantas solares de receptor central y para permitir el desarrollo de la tecnología necesaria.

En la actualidad CESA-I ya no produce electricidad, sino que se opera, con un alto grado de flexibilidad, como una instalación de ensayo de componentes y subsistemas como helióstatos, receptores solares, sistemas de almacenamiento térmico, turbinas de gas solarizadas, sistemas de control e instrumentación para la medida de altos flujos de radiación solar concentrada.

Del mismo modo, también constituye una plataforma empleada para otras aplicaciones que requieran altas concentraciones fotónicas sobre superficies relativamente grandes, como es el caso de procesos químicos a alta temperatura, tratamiento superficial de materiales o experimentos astrofísicos.

La instalación capta la radiación solar directa por medio de un campo de 300 helióstatos, de 39,6 m² de superficie cada uno, distribuidos según una distribución de campo Norte de 16 filas con una extensión de 82.500 m². Así pues, los helióstatos tienen una reflectividad nominal promedio del 90%, el error



de seguimiento solar en cada eje es de 1,2 mrad y la calidad de imagen en rayo reflejado de 3 mrad.

La instalación CESA-I cuenta con la experiencia más extensa en helióstatos tipo vidrio-metal que hay en el mundo, disponiendo en su campo de unidades de primera generación fabricadas por Sener [56] y Casa, así como unidades con facetas reflectantes de segunda generación de la empresa Asinel y facetas y prototipos de tercera generación desarrollados por CIEMAT en colaboración con la empresa Solúcar Energía.

A pesar de sus más de 20 años de antigüedad, el campo de helióstatos se encuentra en un estado óptimo de funcionamiento al haberse mantenido con carácter estratégico un programa continuado de reposición de espejos y facetas y de reparación de componentes en los mecanismos de accionamiento. Al Norte del campo de helióstatos se ubican dos áreas adicionales que son utilizadas como plataforma de pruebas de nuevos prototipos de helióstatos, una situada a 380 m de la torre y la otra a 500 m de distancia. La máxima potencia térmica que proporciona el campo sobre la apertura del receptor es de 7 MW.

Por otro lado, la torre es de hormigón y presenta una altura de 80 m, siendo capaz de soportar una carga de 100 toneladas. A lo largo de la torre hay tres niveles de ensayo:

- **Nivel 1:** Una cavidad adaptada para su uso como horno solar y ensayo de materiales, situada a 45 m de altura, que ha sido utilizada con gran éxito en la reproducción de la rampa de calentamiento, durante su reentrada en la

atmósfera, de las piezas del escudo cerámico de los transbordadores espaciales y también en el tratamiento superficial de aceros y otros compuestos metálicos.

- **Nivel 2:** Una cavidad con un banco calorimétrico de ensayo de receptores volumétricos presurizados a 60 m.
- **Nivel 3:** Una instalación de ensayo de receptores volumétricos atmosféricos en la parte superior de la torre, a la cota de 80 m.

La torre se completa con una grúa en la parte superior con 5 toneladas de capacidad y un elevador montacargas con capacidad para 1.000 kg.



Figura 33. CESA - I



- **SSPS / CRS [55]:**

La planta SSPS-CRS fue inaugurada como parte del proyecto SSPS (Small Solar Power Systems) de la Agencia Internacional de la Energía en septiembre de 1981, tal y como se ha explicado en apartados anteriores.

Originalmente fue concebida como planta de demostración para la producción continuada de electricidad y utilizaba un receptor refrigerado por sodio líquido que era además utilizado como medio de almacenamiento térmico.

Actualmente, al igual que la planta CESA-1, CRS es una instalación de ensayos dedicada fundamentalmente al ensayo de pequeños receptores solares en el rango comprendido entre 200 y 350 kW de potencia térmica. El campo de heliostatos está formado por 91 unidades fabricadas por la compañía Martin-Marietta [57], de 39,3 m² de superficie cada una. Del mismo modo, existe un segundo campo con 20 heliostatos de 52 m² y 65 m² en la zona Norte que puede también ser utilizado como apoyo, siendo en este caso, heliostatos de segunda generación fabricados por MBB y Asinel.

El campo de heliostatos CRS ha sido recientemente mejorado con la conversión de todos sus heliostatos en unidades autónomas, comunicadas por radio con el control central y alimentadas por energía fotovoltaica, siguiendo el concepto desarrollado y patentado por investigadores de la PSA.



La reflectividad nominal promedio del campo es del 90 %, el error de seguimiento solar es de 1,2 mrad por eje y la calidad óptica en rayo reflejado es de 3 mrad. La potencia térmica total del campo asciende a 2,7 MW.

La torre, de 43 m de altura, está constituida por una estructura metálica y dispone de dos plataformas de ensayo.

- **1º Plataforma:** La primera plataforma ocupa dos niveles a 26 y 32 m de altura y es una zona diáfana preparada para acoger ensayos de nuevos receptores para aplicaciones termoquímicas.
- **2º Plataforma:** La segunda plataforma de ensayos se encuentra en lo alto de la torre, a 43 m de altura, y alberga un recinto cerrado con puente grúa y un banco de ensayos calorimétrico para la evaluación de pequeños receptores volumétricos a presión atmosférica.

La infraestructura de la torre se completa con una grúa con capacidad para 600 kg y un elevador de cremallera con capacidad para 1.000 kg.

GEMASOLAR [58]

Gemasolar es la primera planta a escala comercial en el mundo que aplica la tecnología de receptor de torre central y almacenamiento térmico en sales fundidas. La relevancia de esta planta reside en su singularidad tecnológica, ya que abre el camino a una nueva tecnología de generación eléctrica termosolar.



- **Gemasolar:**

Puesta en funcionamiento a finales de Mayo de 2011, situada en Fuentes de Andalucía, Sevilla y construida por la Torresol Energy [58]. Se trata de una central constituida fundamentalmente por un campo de 2650 heliostatos distribuidos siguiendo una disposición según campo circular en 185 hectáreas de terreno, que se orientan según dos ejes siguiendo el movimiento del Sol y que reajustan su posición 15 veces por minuto y un receptor de tipo circular de 8 – 10 m de diámetro y una altura de 10 – 11 m ubicado en una torre de 130 m de altura y capaz de generar una potencia térmica de 120 MWt, siendo capaz, por lo tanto de suministrar una potencia eléctrica de 19,9 MWe, resultando una producción anual de 110 GWh.

El sistema de acumulación en sales utiliza 60% de nitrato de potasio y 40% de nitrato de sodio. Esta combinación es capaz de retener hasta el 99% del calor durante un lapso de 24 horas. Las sales fundidas, utilizadas como fluido de transferencia térmica, alcanzan temperaturas por encima de los 500°C. De este modo, se consigue como resultado, un sistema de almacenamiento térmico capaz de generar la misma energía eléctrica que la que generaría la central funcionando durante 15 horas a potencia nominal. Además la planta se encuentra hibridada con gas natural, contando con una caldera de gas de 16 MWt de potencia.

Por otro lado, señalar que la componente directa de la radiación solar en el lugar en el que se ubica la planta es de 2.172 kWh/m^2 .

La energía generada por Gemasolar se enviará mediante una línea de alta tensión a la subestación de Villanueva del Rey, Andalucía, España, donde se inyecta a la red eléctrica.

El aumento notable de la eficiencia energética de la planta asegura la producción eléctrica durante unas 6.500 horas al año, en torno al 74 % del total, de 1,5 a 3 veces más que otras energías renovables. De este modo, será capaz de abastecer de energía eléctrica a 25.000 hogares y reducirá en más de 30.000 toneladas al año las emisiones de CO₂.



Figura 34. Gemasolar

5. 3.- Cilindros parabólicos

Del mismo modo que anteriormente se desarrollaba en el apartado dedicado a las centrales de torre, las centrales de cilindros parabólicos suponen también una tecnología a tener en cuenta en cuanto al aprovechamiento de la energía solar para generación de energía eléctrica se refiere. De hecho, los sistemas de cilindros parabólicos son la tecnología que está siendo usada en la actualidad para la aplicación a gran escala, la tecnología de torre central, al menos en España, se encuentra todavía en fase de desarrollo.

De éste modo, la tecnología cilindro parabólica basa su funcionamiento en el seguimiento solar y la concentración de los rayos solares en unos tubos receptores de alta eficiencia térmica localizados en la línea focal del cilindro, generando así energía eléctrica, como más adelante se detallará en profundidad.

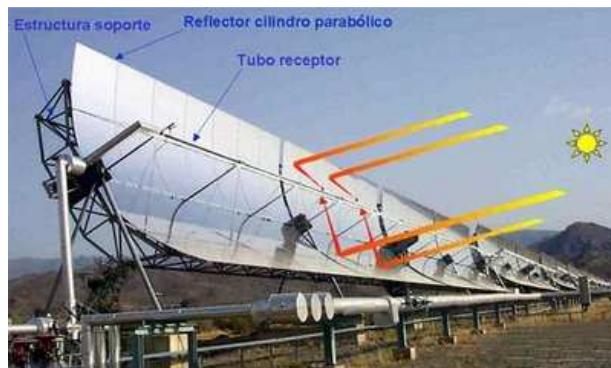


Figura 35. Colector cilindro parabólico

5. 3. 1.- Elementos constituyentes

A continuación se va a llevar a cabo una breve descripción de los elementos constituyentes de la tecnología de cilindros parabólicos, para, más adelante, poder comprender con mayor exactitud cuál es su funcionamiento, como así también las ventajas e inconvenientes que representa su uso.

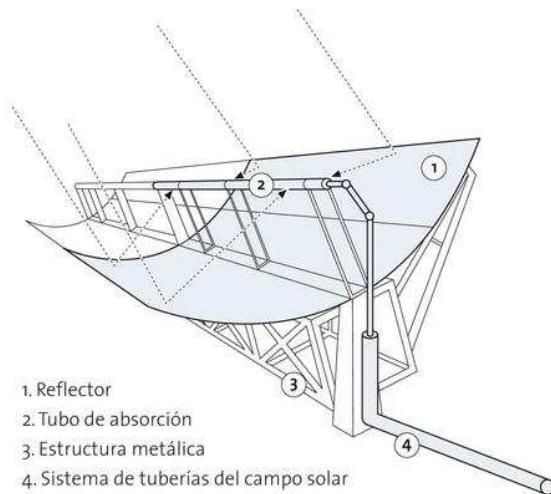


Figura 36. Componentes colector cilindro - parabólico

- **Reflector cilindro parabólico:**

La misión del receptor cilindro parabólico consiste en reflejar y concentrar sobre el tubo absorbente la radiación solar directa que incide sobre la superficie. La superficie especular se consigue a través de películas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da la rigidez suficiente. En la actualidad, la chapa metálica, el vidrio y el plástico, son los materiales más empleados como soporte.



- **Tubo absorbedor:**

El tubo absorbedor consta de dos tubos concéntricos entre los cuales no se encuentra ningún elemento adicional. El interior, por el que circula el fluido que se calienta es metálico y el exterior, es de cristal.

El fluido de trabajo que circula por el tubo interior es diferente según la tecnología empleada. Para temperaturas inferiores a los 200 °C se suele utilizar agua desmineralizada con Etileno-Glicol mientras que para temperaturas situadas entre los 200° C y los 450 ° C se emplea aceite sintético. Las últimas tecnologías permiten la generación directa de vapor mediante la alta presión a la que son sometidos los tubos y la utilización de sales como fluido de trabajo.

- **Sistema de seguimiento solar:**

El sistema seguidor más común aplicado en ésta tecnología consiste en un dispositivo capaz de girar los reflectores cilindro-parabólicos del colector alrededor de un único eje.

- **Estructura metálica:**

La misión de la estructura del colector es la de conferir de la rigidez necesaria al conjunto de elementos que lo componen.

A continuación se muestran dos imágenes en las cuales se pueden apreciar tanto la finalidad del sistema de seguimiento solar como un dispositivo real de colector cilindro – parabólico.

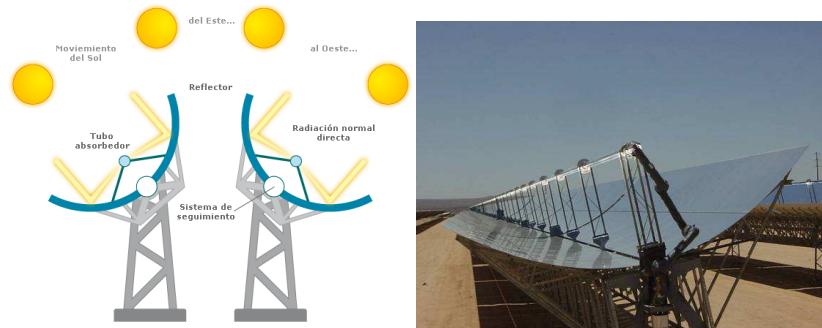


Figura 37. Sistema de seguimiento solar y dispositivo real de colector cilindro - parabólico

Por otro lado, resulta altamente interesante señalar, que la eficiencia que presentan éste tipo de sistemas está directamente relacionada con la eficiencia de cada uno de sus componentes, y han de ser, por tanto, estudiados de modo individual. Así pues, puede hacerse la siguiente clasificación:

- **Elementos concentradores:**

La eficiencia de éste elemento se encuentra ligada tanto a la reflectividad que presenta el espejo acoplado al sistema, que ha de ser, por otro lado, proporcionada por cada fabricante, como a la curvatura del mismo.

- **Estructura soporte:**

El diseño de la estructura ha de optimizar la eficiencia geométrica del colector cilindro parabólico, teniendo para ello en cuenta factores como la capacidad de transmisión del par torsor que el sistema motriz del colector aplica a la estructura, la capacidad para absorber las cargas externas a las que se encuentra sometido el colector, rigidez de la estructura, la capacidad para conservar la distancia focal a lo largo de todo el colector, etc...



- **Tubos absorbedores:**

La eficiencia de estos elementos se encuentra sujeta a diversos factores, como la transmitancia del tubo de vidrio, la absortancia del tubo de metal y la emitancia del tubo de metal. La eficiencia de este componente pues, queda maximizada si lo hacen también los dos primeros factores mencionados y se minimiza la emitancia del tubo de metal.

Para la comprensión de éste punto es interesante señalar que la transmitancia de un cuerpo es la cantidad de energía térmica que es capaz de pasar a su través por unidad de tiempo, absortancia es la fracción de radiación absorbida por una superficie por unidad de tiempo y la emitancia la cantidad de radiación emitida por una superficie por unidad de tiempo.

- **Sistema de seguimiento:**

Tanto el control, como el sistema motriz del colector cilindro parabólico han de ser optimizados para que el seguimiento de las trayectorias del Sol a lo largo del año se realice de modo continuo y sin interrupciones de ningún tipo. Del mismo modo los costes asociados a la producción de éste componente han de ser los menores posibles, para no encarecer en exceso el dispositivo.

Finalmente, se van a proporcionar unos valores orientativos de eficiencias de algunos de los componentes de éste tipo de sistemas. Así pues, puede considerarse una eficiencia media anual para el campo de concentradores del 50 %, una eficiencia media anual para el circuito de la turbina del 30 % y una del 15 % para el resto de la



instalación, obteniendo valores pico del 70%, 40 % y 28 % respectivamente para cada uno de los colectores mencionados [59].

5. 3. 2.- Funcionamiento

En el interior de los tubos, un fluido de trabajo es el encargado de transmitir el calor, de éste modo, un aceite sintético es calentado por los rayos solares concentrados a una temperatura de aproximadamente 400°C. Este aceite es bombeado a través de una serie de intercambiadores de calor con el objetivo de producir vapor, que más tarde, y debido a su paso a través de turbinas, será el encargado de generar la energía eléctrica.

El calor presente en este vapor, se convierte en electricidad en una turbina de vapor convencional.

Por otro lado, resulta interesante resaltar el hecho de que las plantas cilindro parabólicas permiten almacenar el calor mediante tecnología de sales y la hibridación con ciclo combinado, ISCC en inglés.

5. 3. 3.- Esquemas de instalación

A continuación, se van a desarrollar los distintos esquemas de disposición de las centrales de colectores cilindro parabólicos. El motivo por el cual éste punto se ha desarrollado para ésta tecnologías mientras que para el resto no, se debe a que los colectores cilindroparabólicos resultan ser sistemas con un nivel de desarrollo muy superior a las demás tecnologías de explotación termosolar, de modo que las centrales



que se encuentran en funcionamiento en la actualidad se dedican a la producción masiva de energía eléctrica destinada a la venta a la red de distribución general, mientras que en el caso la tecnología referida a los dispositivos de disco Stirling o las centrales termosolares de torre central se encuentra todavía en fase de estudio y desarrollo.

Pueden distinguirse en la actualidad tres configuraciones diferentes para las plantas de concentración de cilindros parabólicos. La configuración más simple produce electricidad solamente durante las horas de sol. Otros métodos como el almacenamiento y la hibridación permiten la gestionabilidad de la electricidad de forma que pueda ser producida cuando la red eléctrica lo requiera.

- **Planta básica:**

En una planta de concentración de energía termosolar, mediante dispositivos cilindro-parabólicos, dispuestos en configuración básica, se genera energía eléctrica de forma continua a lo largo de todo el día, durante las horas que tiene lugar el ciclo solar.

Esta configuración de la planta supone una gran sencillez en su implementación así como en su control, sin embargo, también presenta diversos inconvenientes que no la hacen del todo adecuada si para la generación de energía eléctrica de modo continuo es requerida, entre los cuales pueden destacarse el hecho de que para el correcto funcionamiento de la misma sea necesaria una radiación directa por parte del Sol, esto es, sin ningún tipo de nubes que atenúen tal radiación, de modo que resulta ser una configuración altamente dependiente de las condiciones atmosféricas.

Por otro lado, la energía eléctrica únicamente puede ser generada durante el día, ya que por la noche no puede ser captada la radiación del Sol debido a su inexistencia derivada de las distintas posiciones que adquiere el Sol a lo largo de su ciclo.

De éste modo y como ya se ha comentado con anterioridad, no resulta ser una disposición adecuada cuando de la generación continua de energía eléctrica se trata.

A continuación se muestra un esquema de una configuración básica para una planta de concentración con dispositivos cilindro-parabólicos.

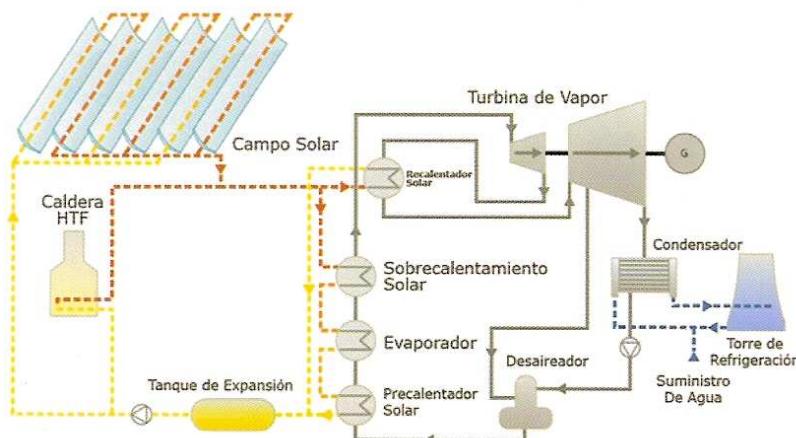


Figura 38. Configuración básica planta de cilindros parabólicos.

- **Planta híbrida ciclo combinado – solar:**

La utilización combinada de la energía solar térmica de alta – media temperatura y un combustible fósil o renovable como la biomasa, forma parte de las posibles alternativas de obtención de energía eléctrica de forma más eficiente y con menores consecuencias medioambientales, considerando un futuro a medio – largo plazo.

Esta hibridación aporta una serie de ventajas para la instalación solar, como pueden ser, una mayor gestionabilidad de la energía, adaptación de la generación a la demanda de electricidad, estabilidad de la producción en los transitorios, apoyo en arranques y mayor utilización de los equipos de generación eléctrica.

Así pues, el grado de hibridación puede ser muy variable, desde plantas que sólo recurren al combustible fósil para eliminar o reducir al mínimo imprescindible el almacenamiento térmico y cuya función principal es absorber los transitorios producidos por variaciones más o menos bruscas de la radiación solar y garantizar la producción, hasta ciclos combinados convencionales apoyados por energía solar, en los que el aporte de esta última fuente energética está entre el 10 y el 20 % de la producción.

Un esquema de una planta de colectores cilindro parabólicos hibridada para la generación mediante ciclo combinado solar se muestra a continuación.

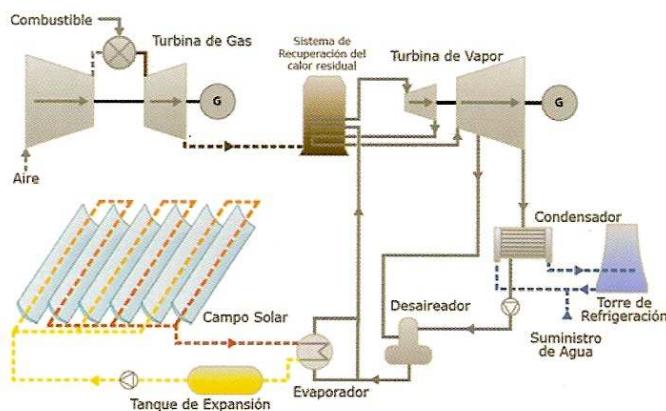


Figura 39. Configuración hibridada de planta de colectores cilindro parabólicos.



- **Planta con tecnología de sales fundidas:**

La tecnología de sales fundidas para el almacenamiento térmico es empleada en centrales termosolares en general, incluidas en ellas las centrales con colectores cilindro parabólicos, centrales objeto de nuestro estudio, con el objeto de almacenar energía térmica para su posterior uso en la generación de energía eléctrica cuando no sea posible la generación directa de la misma, debido a transitorios como pueden ser condiciones atmosféricas adversas o incluso durante las horas en las que no es posible captar la radiación solar, tal y como se ha comentado con anterioridad y por el contrario sea necesario una producción continua de energía eléctrica.

De éste modo entre las diferentes características que les son requeridas al medio de almacenamiento empleado, pueden destacarse, entre otras, una alta densidad energética, una buena tasa de transferencia energética entre el fluido de trabajo absorbedor de calor y el fluido de almacenamiento, una alta estabilidad mecánica y química, una reversibilidad completa para ciclos de carga y descarga del proceso y un método de control y regulación eficiente y relativamente sencillo ser implementado.

A continuación se muestra un esquema de la disposición que muestra una planta de concentración con colectores cilindro-parabólicos y sistema de almacenamiento térmico mediante sales fundidas.

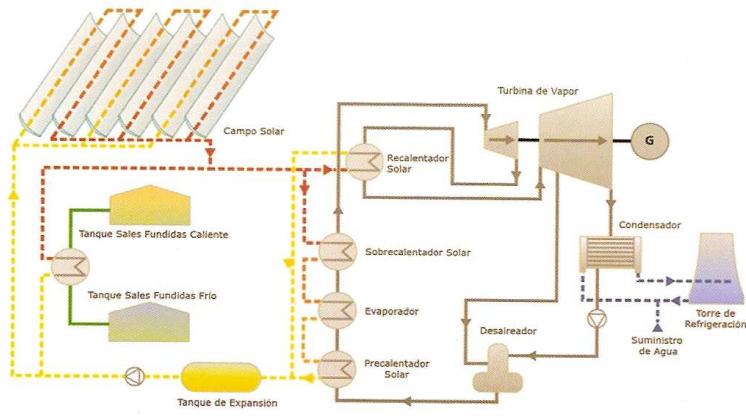


Figura 40. Configuración de planta de colectores cilindro parabólicos con tecnología de sales fundidas.

5. 3. 4.- Presencia mundial de centrales de cilindros parabólicos

A pesar de que a nivel mundial resulta ser una tecnología presente en numerosas regiones, en éste apartado, se va a centrar el estudio de las centrales de cilindros parabólicos en la Generación de Sistemas de Energía Solar (SEGS), por considerarse las más importantes en cuanto a volumen de energía producido y estado de la tecnología y en Blythe, porque a pesar de ser una plataforma todavía en construcción, una vez esté finalizada, será la plataforma que cuente con la mayor potencia en colectores cilindro – parabólicos instalada hasta el momento.

- **Generación de Sistemas de Energía Solar (SEGS) [60]:**

En California, en el desierto del Mojave, se sitúa la instalación denominada como Generación de Sistemas de Energía Solar (SEGS), la mayor planta de aprovechamiento de energía solar del mundo.



La instalación se compone de nueve plantaciones de colectores cilindro parabólicos, con una capacidad total de 354 MW de potencia eléctrica instalada, presentando un total de 936.384 espejos reflectantes, por lo que, como ya se ha comentado con anterioridad, constituye la mayor instalación de plantas solares de cualquier tipo en el mundo. El promedio de la producción bruta de energía solar en las nueve plantas SEGS se sitúa en torno a 75 MW eléctricos, con un factor de capacidad del 21 %, cociente entre la energía real generada por la planta y la energía que hubiese generado en el mismo tiempo si hubiese trabajado siempre a plena carga.

Por otro lado, éstas plantaciones presentan una configuración híbrida de ciclo combinado solar, esto es, tal y como ya se ha desarrollado anteriormente, el empleo durante las horas nocturnas de funcionamiento de un combustible fósil, gas natural en éste caso en concreto, para la generación de energía eléctrica. De cualquier modo, la energía eléctrica generada mediante gas natural supone tan solo un 10 % del total, quedando para la generación mediante el aprovechamiento de la radiación solar el 90 % restante.

Por otro lado, y con respecto al elemento constituyente de mayor relevancia, los espejos en éste caso, resulta necesario destacar el hecho de que presentan una capacidad reflectiva del 94 %, a diferencia de los espejos convencionales de los que se obtienen valores tan solo del 70 %. Del mismo modo, resultan ser los elementos más delicados de toda la instalación, siendo necesaria la sustitución de 3.000 ejemplares cada año debido a averías y roturas.

Así mismo, presentan un dispositivo de autolavado con el objetivo de mantener

la superficie espejular lo más limpia posible para aprovechar al máximo la radiación procedente del Sol.



Figura 41. Plataforma SEGS

Así pues, las plantaciones SEGS son capaces de abastecer de energía eléctrica a 232.500 viviendas, evitando de éste modo la emisión de 3.800 toneladas anuales de residuos contaminantes que en caso de no haber sustituido los recursos fósiles como el petróleo por la radiación solar, hubiesen sido generados.

Por último se ha creído conveniente presentar un cuadro resumen con las características de las 9 plantaciones de que se compone la instalación.

| SEGS | SEGS I | SEGS II | SEGS III | SEGS IV | SEGS V | SEGS VI | SEGS VII | SEGS VIII | SEGS IX |
|-----------------------|---------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Primer año operativa | 1985 | 1986 | 1987 | 1987 | 1988 | 1989 | 1989 | 1990 | 1991 |
| Ubicación | Daggett | Daggett | Kramer Jct | Harper Lake | Harper Lake |
| Potencia neta (MWe) | 13,8 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 80 | 80 |
| Temp. Aceite (°C) | 307 | 316 | 349 | 349 | 349 | 390 | 390 | 390 | 390 |
| Area campo col. (m2) | 82960 | 190338 | 230500 | 230500 | 250500 | 188000 | 194280 | 464340 | 483960 |
| Ef. Turb. solar (%) | 31,5 | 29,4 | 30,6 | 30,6 | 30,6 | 37,5 | 37,5 | 37,6 | 37,6 |
| Ef. Turbina fósil (%) | - | 37,3 | 37,4 | 37,4 | 37,4 | 39,5 | 39,5 | 39,5 | 39,5 |
| Prod. Anual (MWh) | 30100 | 80500 | 92780 | 92780 | 91280 | 90850 | 92646 | 252750 | 256123 |

Tabla 4. Resumen con las características de las diferentes plantaciones SEGS.



- **Blythe Proyecto de Energía Solar [61]:**

El proyecto Blythe consiste en una plataforma de concentración de energía solar en construcción, constituida por cuatro estaciones, que proporcionarán en total en torno a 968 MW de potencia eléctrica y que se encontrarán situadas en la estación de Riverside County, en California.

La plataforma estará constituida por colectores cilindro parabólicos, y las empresas involucradas en su construcción son Solar Millennium [62] y Chevron [63]. Solar Millennium estima que tardará al menos seis años en completar las cuatro sub unidades de que constará la instalación, de 242 MW de potencia cada una.

Se trata de un proyecto de 6.000 millones de dólares, que al cambio suponen 4.218.200 Euros y que se abarcara una superficie final de 7.025 hectáreas. Una vez finalizado el proyecto Blythe, la planta solar casi triplicará los 585 MW de capacidad actual de generación de electricidad a partir de energía solar en EE. UU teniendo de éste modo capacidad para generar prácticamente tres veces la electricidad producida en la mayor instalación solar del país, la unidad de 354 MW SEGS, en California.



- **Solana [50]:**

La Estación de Generación Solana es una planta de energía solar que se encuentra en construcción cerca de Gila Bend , Arizona , a unos 70.110 km al suroeste de Phoenix. Está siendo construida por la empresa española Abengoa Solar, y tendrá una capacidad total de 280 MW, lo que resultará suficiente para abastecer a 70.000 hogares y evitar alrededor de 475.000 toneladas de dióxido de carbono que de otro modo serían emitidas a la atmósfera.

Arizona Public Service (APS) [69] se ha comprometido a comprar el 100% de la potencia generada a partir de Solana, para cumplir con las Corporaciones de la Comisión de Arizona (ACC), que exigen que las empresas reguladas del estado contribuyan con el 15% de su electricidad generada a partir de fuentes de energía renovable para el año 2025. La planta Solana, prevista originalmente para el 2011, tendrá un costo estimado de 1.5 millones de euros.

La planta estará constituida por dispositivos colectores cilíndrico parabólicos diseñados y desarrollados por Abengoa , y cubrirá un área de 770 hectáreas. La construcción se espera crear unos 1.500 puestos de trabajo de la construcción;. Una vez terminada, la planta dará empleo a 85 trabajadores a tiempo completo



5. 3. 5.- Centrales de cilindros parabólicos en España:

Existen diversas centrales termosolares en España que se encuentran o bien en funcionamiento o en construcción y que presentan tecnología de colectores termosolares. De éste modo, se ha creído conveniente analizar algunas de ellas, las que resultan más interesantes desde el punto de vista de potencia instalada, en detalle para tener una verdadera idea del estado de desarrollo de ésta tecnología actualmente, así como sus limitaciones, ventajas y desventajas.

- **Andasol [64]:**

Andasol se trata de un complejo de centrales termosolares en funcionamiento, constituido por Andasol-1, Andasol-2 y Andasol-3, diseñado y construido por Solar Millenium y Cobra Energía [65], filial de ACS [66].

ACS lidera el mercado de las nuevas tecnologías de colectores solares europeos, desarrollados en colaboración con la Planta Solar de Almería y cualificados comercialmente en las plantas SEGS de California. Del mismo modo, los proyectos termosolares Extresol [67], de 50 MW, situado en Badajoz, Extremadura y Manchasol [68], de 50 MW también, situado en Ciudad Real, Castilla la Mancha, ambos de tecnología de colectores cilindro – parabólicos, están siendo promovidos, construidos y operados por el Grupo ACS a través de su área en renovables, Cobra Energía.

Andasol-1, Andasol-2 y Andasol-3, de 50 MWe de potencia eléctrica cada una, se encuentran ubicados en la Comarca de Guadix, en el municipio de Aldeire y La Calahorra, en la provincia de Granada, en uno de los

altiplanos más elevados y extensos de la Península Ibérica, estando situada la altura media a 1.100 m de altura. Gracias a esta altura posee uno de los mejores recursos de radiación solar directa de España.

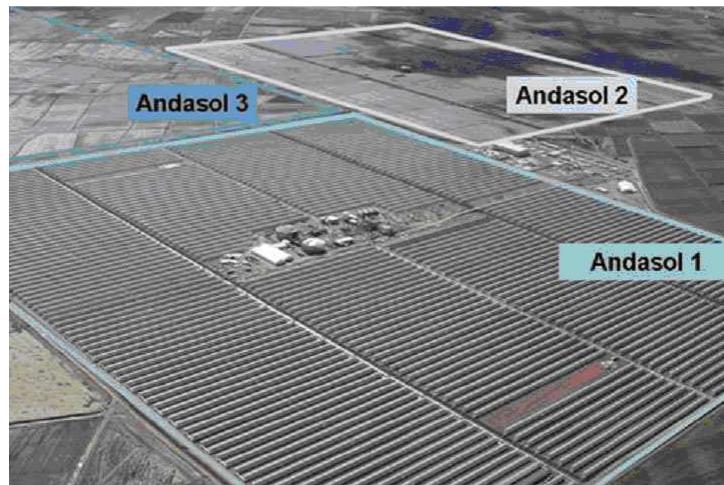


Figura 42. Central Andasol

Su situación próxima a una línea de alta tensión de 400 kV, la disponibilidad de aguas de refrigeración provenientes de la falda norte de Sierra Nevada, la proximidad de infraestructuras de carretera y ferrocarril y la disposición de terreno llano sin protección por causas medioambientales, hace que sea el emplazamiento perfecto para la implementación del proyecto.

Con una inversión de cerca de 300 millones de Euros por planta, se trata de las mayores plantas solares del mundo construidas en los últimos 15 años y solo superadas por SEGS VIII y SEGS IX, de 90 MWe cada una, construidas en California a principios de los 90.

Las plantas suministran electricidad a 250.000 hogares. La novedad de estas centrales, dentro del mundo de las energías renovables, consiste en su

gestionabilidad, es decir, su capacidad de entregar energía a la red eléctrica en función de las necesidades. Esto se consigue gracias a dos características importantes. En un primer lugar se debe a la integración de campos solares sobredimensionados respecto a las turbinas y al almacenamiento de la energía térmica sobrante en grandes tanques de sales fundidas capaz de generar el equivalente en energía a 7,5 horas de funcionamiento de la central a plena carga. Esta energía térmica acumulada genera electricidad a demanda en momentos en que la luz solar disminuye o es nula.

En segundo lugar, esta gestiónabilidad de la que se habla se encuentra íntimamente ligada al hecho de ser una central hibridada con gas natural. Esto es, presenta una turbina de gas, que complementa los aportes térmicos en cantidades nunca superiores al 15 % de la energía eléctrica generada por la central, tal y como se verá en el apartado específico de hibridación más adelante.

Del mismo modo resulta interesante destacar, que la plataforma Andasol será ampliada con una nueva central, Andasol-4, de 100 MW de potencia en colectores cilindro – parabólicos que se encuentra todavía en construcción.

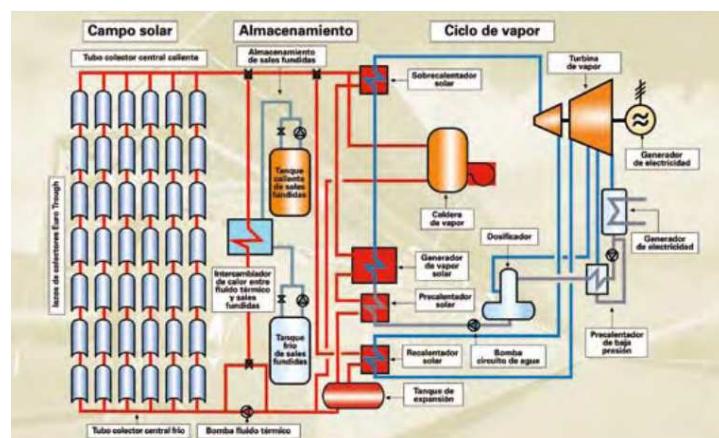


Figura 43. Esquema planta Andasol.



- **Plataforma Solúcar , Solnova [50]:**

En la plataforma Solúcar, situada en Sanlúcar la Mayor, Sevilla, pueden encontrarse las tres estaciones Solnova, capaces de proporcionar cada una de ellas 50 MW de potencia eléctrica y construidas todas ellas por Abengoa Solar Energy, empresa española. Cada una de ellas ocupa una superficie en el terreno de 115 hectáreas mediante 300.000 m² de espejos.

Todas ellas, Solnova I, Solnova III y Solnova IV, se encuentran preparadas también para la generación de energía eléctrica mediante la combustión de gas natural, en ocasiones en que la demanda sea superior a la que es posible generar con tan solo el aporte solar o cuando las condiciones meteorológicas no permitan tal generación.

Por último, señalar que actualmente se encuentran en funcionamiento las ya comentadas anteriormente Solnova I, Solnova III y Solnova IV, todas ellas finalizadas en el año 2010 aportando de éste modo una potencia final a la estación Solnova de 150 MW. Sin embargo Solnova II y Solnova V, se encuentran en fase de diseño y desarrollo, de modo que una vez quedé finalizado el proyecto Solnova, la estación estará dotada de una potencia eléctrica de 250 MW.



Para finalizar éste apartado, se ha decidido mostrar una tabla con las principales centrales termosolares en funcionamiento con tecnología de colector cilindro – parabólico situadas tanto en España como en el extranjero.

| Colectores cilíndrico parabólicos en funcionamiento | | | |
|---|--------------------------------------|--------|----------------|
| Capacidad (MW) | Nombre | País | Ubicación |
| 354 | Generación de Energía Solar Sistemas | EE. UU | California |
| 150 | Solnova | España | Sevilla |
| 100 | Andasol estación de energía solar | España | Granada |
| 100 | Extresol Solar Power Station | España | Badajoz |
| 64 | Nevada Solar One | EE. UU | Nevada Ciudad |
| 50 | Ibersol Ciudad Real | España | Real |
| 50 | Alvarado I | España | Badajoz |
| 50 | La Florida | España | Badajoz |
| 50 | Majadas de Tietar | España | Cáceres |
| 50 | La Dehesa | España | Badajoz |
| 50 | Palma de Río I | España | Córdoba |
| 50 | Palma de Río II | España | Córdoba Ciudad |
| 50 | Manchasol I | España | Real |
| 17 | Yazd Solar | Irán | Yazd |
| 5 | Archimede planta de energía solar | Italia | Sicilia |
| 1 | Saguaro Solar Power Station | EE. UU | Red Rock |

Tabla 5. Centrales de cilindro parabólico en funcionamiento.

Del mismo modo, se ha estimado oportuno mostrar una tabla con las principales centrales termosolares con tecnología de colector cilindro – parabólico que se encuentran en fase de construcción, tanto en España, como en el extranjero también.

| Colectores cilindro parabólicos en construcción | | | |
|---|----------------------------------|--------|----------------------|
| Capacidad (MW) | Nombre | País | Ubicación |
| 968 | Blythe Proyecto de Energía Solar | EE. UU | Condado de Riverside |
| 280 | Solana | EE. UU | Arizona |
| 100 | Andasol | España | Granada |
| 100 | Helioenergy | España | Ecija |
| 100 | Solaben | España | Logrosan |
| 100 | Valle Solar Power Station | España | Cádiz |
| 100 | Termosol | España | Navalvillar de Pela |
| 100 | Helios | España | Ciudad Real |
| 50 | Extresol | España | Badajoz |
| 50 | Lebrija | España | Lebrija |
| 50 | Axtesol | España | Badajoz |
| 50 | Arenales | España | Sevilla |
| 50 | Serreuela Solar | España | Badajoz |
| 50 | El Reboso II | España | Sevilla |
| 50 | El Reboso III | España | Sevilla |
| 50 | Idiota | España | Sevilla |
| 50 | Olivenza | España | Badajoz |
| 50 | Medellín | España | Badajoz |
| 50 | Valdetorres | España | Badajoz |
| 50 | Badajoz II | España | Badajoz |
| 50 | Santa Amalia | España | Badajoz |
| 50 | Torrefresneda | España | Badajoz |
| 50 | La Puebla II | España | Sevilla |
| 50 | Aleación de Ispat Carporate | India | Rajasthan |
| 25 | Termosolar Borges | España | Lérida |

Tabla 6. Centrales de cilindro parabólico en construcción.



6.- VALORES ORIENTATIVOS DE EFICIENCIA

En éste apartado, y una vez llevado a cabo en líneas anteriores el desarrollo de las diferentes tecnologías de generación eléctrica a partir del aprovechamiento de la energía procedente de la radiación solar, se va a realizar un breve resumen a modo de comparativa entre las diferencias existentes en las eficiencias obtenidas para cada una de las tecnologías estudiadas.

De éste modo será posible apreciar de un modo más intuitivo la realidad del estado actual de desarrollo para cada una de ellas, entendiendo así la existencia o carencia de posibilidades para su explotación en un futuro como un medio sostenible y rentable de obtención de energía a partir de una fuente de energía renovable.

Así pues dentro de las tecnologías de aprovechamiento de la radiación solar, pueden distinguirse dos grupos bien diferenciados, a saber, energía fotovoltaica y energía solar térmica.

Las eficiencias que se desprenden de la tecnología fotovoltaica están directamente relacionadas con dos características intrínsecas a los paneles fotovoltaicos, como pueden ser la estructura que presentan y el material empleado en los mismos. De este modo, según si la estructura del silicio sea cristalina o amorfa se obtendrán rendimientos en torno al 14 % o del 6 %. Por otro lado, además del silicio, actualmente



también se producen placas denominadas de capa delgada, empleando por lo general como material teluro de cadmio CdTe. Así pues, en función de los materiales, las eficiencias están en los siguientes valores:

- **Silicio cristalino:**

- **Silicio monocristalino**, con eficiencias en torno al 12 – 14 %.
- **Silicio policristalino**, con eficiencias en torno al 11 – 13 %.

- **Tecnologías de capa delgada:**

- **Silicio amorfo**, con eficiencias en torno al 6 – 8 %.
- **Teluro de cadmio**, con eficiencias en torno al 8 %.
- **Arseniu de galio**, con eficiencias en torno al 20 %.
- **Diseleniu de cobre en indio**, con eficiencias en torno al 9 %.
- **Tándem**, con eficiencias en torno al 35 %.

Así pues, puede concluirse, siempre sujeto a las variaciones intrínsecas de cada caso en particular, que la eficiencia media anual que se desprende del empleo de la tecnología fotovoltaica se sitúa en torno a un valor del 12%.

Por otro lado, y dentro de las tecnologías asociadas al aprovechamiento de la energía solar térmica, pueden distinguirse distintos tipos de sistemas, a saber centrales de torre, concentradores cilíndrico parabólicos y dispositivos de disco Stirling.

En el caso de las centrales de torre, las eficiencias se analizan proceso a proceso, siendo en el caso del proceso combinado de turbina de gas y vapor una eficiencia del



50% y en el caso de turbina simple del 35%, y al tipo de sustancia empleada como fluido de trabajo en el receptor, siendo los valores de eficiencia obtenidos del 80% para sales fundidas, 88% para vapor saturado y 83% en el caso de aire atmosférico. Así pues, puede considerarse un rendimiento medio anual para ésta tecnología del 20%, siempre sujeto a variaciones asociadas a las particularidades de cada situación.

Del mismo modo, en el caso de los colectores cilíndrico parabólicos, los rendimientos han de ser analizados individualmente para cada uno de los componentes que los constituyen, resultando valores de eficiencia del 50% para el campo de concentradores, del 30 % para el proceso asociado a la turbina y del 15% para el resto de la planta. De éste modo, puede considerarse un rendimiento medio anual para éste tipo de sistemas situado entre el 13% y el 15%.

Finalmente el en caso de la tecnología de disco Stirling, también debe analizarse componente a componente los rendimientos obtenidos, sin embargo, debido a la falta de información al respecto, en éste caso se puede considerar un rendimiento general asociado a todo el dispositivo, encontrándose, no obstante, las diferencias en valores de eficiencia, en los dispositivos desarrollados por cada compañía en particular.

Así pues, en el caso de Trinum, dispositivo desarrollado por la compañía Innova Technology Solutions, pueden encontrarse eficiencias para la conversión de energía solar en energía térmica del 40%, mientras que para la conversión de energía solar en energía eléctrica se sitúa en torno al 13%.



En el caso del sistema SunCatcher, diseñado por la compañía Stirling Energy Systems, puede considerarse una eficiencia para la conversión de energía solar en eléctrica del 26%, un valor notablemente superior, mientras que para el dispositivo PowerDisch elaborado por la compañía InfiniaCorp, éste valor se sitúa en el 24 %, similar al que puede encontrarse en los dispositivos de disco Stirling desarrollados por Renovalia, que también es del 24 %.

Así pues, e igual que se ha hecho en los casos anteriores, se va a considerar un rendimiento medio anual, para la conversión de energía solar en energía eléctrica, en los dispositivos de disco Stirling que se sitúa en torno a valores del 24%.

Finalmente se va ha creído conveniente mostrar aquí un cuadro resumen con los valores de eficiencia medios adoptados para cada una de las tecnologías, con el fin de clarificar y mostrar de un modo más intuitivo las diferencias existentes entre cada una de ellas.

| | |
|-----------------------|--------|
| PANELES FOTOVOLTAICOS | 12% |
| CENTRALES DE TORRE | 20% |
| CILINDROS PARABOLICOS | 13-15% |
| DISCO STIRLING | 24% |

Tabla 7. Eficiencias según tecnología.



Del mismo modo, se ha creído conveniente mostrar el cuadro de eficiencias desglosado, a modo de esquema de todo lo comentado anteriormente.

| ENERGÍA FOTOVOLTAICA 12 % | |
|--|------------|
| Tecnología | Eficiencia |
| Cristalinos | |
| Silicio monocristalino | 12 - 14 % |
| Silicio policristalino | 11 - 13 % |
| De capa delgada | |
| Silicio amorfo | 6 - 8% |
| Teluro de cadmio | 8% |
| Arseniuro de galio | 20% |
| Diseleniuro de cobre en indio | 9% |
| Tándem | 35% |
| ENERGIA SOLAR TERMICA | |
| CENTRALES DE TORRE 20% | |
| PLANTA: Segundo tipo de proceso | |
| Proceso combinado turbina de gas y vapor | 50% |
| Proceso turbina de vapor simple | 35% |
| RECEPTOR: Segundo fluido de trabajo | |
| Sales fundidas | 80% |
| Vapor saturado | 88% |
| Aire atmosférico | 83% |
| CILINDROS PARABOLICOS 13-15% | |
| Segundo componentes de la instalación | |
| Campo solar (concentradores) | 50% |
| Circuito de la turbina | 30% |
| Planta | 15% |
| DISCO STIRLING 24% | |
| Trinum E. Solar - E. Térmica | 40% |
| Trinum E. Solar - E. Eléctrica | 13% |
| SunCatcher E. Solar - E. Eléctrica | 26% |
| Renovalia E. Solar - E. Eléctrica | 24% |
| PowerDish E. Solar - E. Eléctrica | 24% |

Tabla 8. Eficiencias según tecnología, desglosado.



7.- FUTUROS DESARROLLOS

7. 1.- Cogeneración

7. 1. 1.- Introducción

En éste apartado, y con objeto de reducir el volumen del proyecto, se va a realizar una breve descripción acerca de en qué consisten los sistemas de cogeneración así como algunas de las ventajas que se derivan de su uso. Del mismo modo se realizará un breve análisis de la tecnología de cogeneración aplicada a los dispositivos de disco Stirling.

Por otro lado, en el Anexo II, se ampliará la información en lo referente a los sistemas de cogeneración, mediante la descripción de los elementos constituyentes de los mismos, su implementación en centrales termosolares, así también como algunos datos relevantes acerca de la evolución de los mismos en España.

Así pues, la cogeneración es el procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil, como vapor, agua caliente sanitaria, etc.... Si además se produce frío, en forma de hielo, agua fría o aire frío, por ejemplo, entonces se llama Trigeneración.

La producción simultánea supone que puede ser utilizada simultáneamente, lo que implica proximidad de la planta generadora a los consumos, en contraposición al sistema convencional de producción de electricidad en centrales termoeléctricas independientes, donde también se desprende calor, pero éste no es aprovechado y ha de



ser eliminado al ambiente. De éste modo se inicia la descentralización de los sistemas generadores de energía eléctrica, que tal y como ya se ha comentado anteriormente resulta ser un paso imprescindible hacia la búsqueda de un sistema mundial energético sostenible a largo plazo y respetuoso a la vez con el medio ambiente.

Recordemos que la termodinámica obliga a la evacuación de una cierta cantidad de calor en todo proceso térmico de producción de electricidad, ya que todo el calor absorbido no puede transformarse en trabajo. El objetivo de la cogeneración es que no se pierda esta gran cantidad de energía.

En los sistemas de cogeneración la energía empleada para generar la energía eléctrica y térmica es mucho menor que el utilizado en los sistemas convencionales de generación de energía eléctrica y térmica por separado, es decir, que del 100% de energía contenida en el combustible, en una termoeléctrica convencional sólo 33% se convierte en energía eléctrica, mientras que el resto se pierde a través del condensador, los gases de escape, las pérdidas mecánicas, las pérdidas eléctricas por transmisión y distribución entre otras. En los sistemas de cogeneración, se aprovecha hasta el 84% de la energía contenida en el combustible para la generación de energía eléctrica y calor, con una eficiencia del 25-30% en la generación de energía eléctrica y del 59-54% en el proceso térmico.

Este procedimiento tiene aplicaciones tanto industriales como en ciertos grandes edificios en los que el calor puede emplearse para calefacción, para refrigeración, mediante sistemas de absorción, y preparación de agua caliente sanitaria como por ejemplo grandes superficies de ventas, ciudades universitarias, hospitalares, etc.



En el caso de tratarse de la cogeneración de electricidad y calor destinada a ser consumida en el hogar, entonces recibe el nombre de micro – generación (mCHP), que no va a ser comentada en ésta apartado por haber sido convenientemente desarrollada en el apartado referido a las aplicaciones del motor Stirling.

Así pues, algunas de las ventajas que se desprenden del empleo de éste tipo de sistemas en la producción de energía eléctrica pueden ser:

- Alta eficacia, lo que significa menor consumo de combustible y menores emisiones de CO₂ o de otro tipo y por ende, una contribución al desarrollo sostenible.
- Significa menos pérdidas en la red eléctrica, debido a que las instalaciones suelen estar más cerca del punto de consumo, facilitando así una generación más distribuida.
- Mayor competencia entre productores de electricidad, debido a que la tecnología de la cogeneración permite que entren en el mercado nuevos competidores.
- Oportunidades de creación de nuevas empresas. Fundamentalmente PYMEs, empresas en colaboración y otras fórmulas de cooperación entre partes interesadas.(de la industria, la electricidad, la tecnología).



7. 1. 2.- Tecnología en sistemas disco Stirling

Los sistemas de cogeneración, resultan ser una tecnología altamente interesante en los dispositivos de disco Stirling, ya que a las propiedades que se desprenden de los generadores en ellos usados, los motores de tipo Stirling, resultan ser sistemas capaces de producir energía eléctrica y térmica simultáneamente.

De éste modo, en cualquier proceso termodinámico una cierta cantidad de calor ha de ser expulsada al exterior, que, en términos referidos a la cogeneración, puede ser aprovechada para producir Agua Caliente Sanitaria (ACS), calefacción de los hogares o pequeñas y medianas industrias.

Así pues, un ejemplo práctico de cogeneración en los dispositivos disco Stirling podría ser el sistema desarrollado por Innova Technology Solutions SpA [103], Trinum. Tal y como ya se ha desarrollado en el apartado correspondiente, Trinum es capaz de cogenerar, a partir de la misma radiación solar absorbida, 1 kW_e de potencia eléctrica y 3 kW_t de potencia térmica, en forma de agua caliente a 60-65 °C, con eficiencias del 13 % y del 40 %, respectivamente.

De éste modo, según afirma Francesco Guidetti, director ejecutivo de Innova, en un artículo publicado por CSP Today [104], se trata de un dispositivo de reducido tamaño, orientado hacia el mercado residencial y las empresas de pequeño o mediano tamaño, que necesitan tanto calor como electricidad.



7. 2.- Almacenamiento térmico

7. 2. 1.- Introducción

La radiación solar no puede ser almacenada por lo que, al margen de la hibridación con una fuente energética almacenable, como la biomasa o el gas natural, que será desarrollada convenientemente en apartados venideros, el concepto de almacenamiento al que se hace referencia es al almacenamiento en forma de energía térmica o química, esta última todavía no disponible, de forma que la energía procedente del sistema pueda utilizarse en los períodos del día cuando la energía solar no está disponible.

Así pues, el sistema de almacenamiento térmico permite la operación estable de una central o una planta energética termosolar, en períodos de ausencia o alta variabilidad de radiación solar.

En éste apartado, y tal y como ya se ha explicado en el apartado anterior, por cuestiones de espacio, se va a centrar el estudio de los sistemas de almacenamiento en lo referente a su aplicación en los dispositivos de disco Stirling, analizando el estado de desarrollo que presentan en la actualidad, siendo para ello imprescindible un estudio previo de los materiales de cambio de fase, tecnología de gran importancia en cuanto al almacenamiento térmico en dispositivos de disco Stirling.

Por otro lado, la información desarrollada será ampliada en el Anexo III, mediante el estudio de los diferentes criterios de clasificación de los sistemas de almacenamiento térmico, su aplicación específica para centrales termosolares así como el estado actual de desarrollo en sistemas de almacenamiento de las mismas y



finalmente con una breve descripción de las nuevas tecnologías de almacenamiento térmico que se encuentran en fase de estudio y desarrollo en la actualidad.

7. 2. 2.- Materiales de cambio de fase

Los materiales de cambio de fase, de aquí en adelante PCMs, resultan ser materiales que son capaces de absorber o desprender calor cuando cambian de fase sólida a fase líquida y viceversa.

De éste modo, existe un gran beneficio en cuanto a densidad de energía se refiere en estos materiales. El problema consiste, de nuevo, en la forma de añadir o eliminar calor de estos materiales a la velocidad necesaria, esto es, el control de los procesos de carga y descarga, el control del sistema.

Así pues, un material de cambio de fase, PCM, es aquel que experimenta un cambio de estado (sólido ↔ líquido ↔ gaseoso) a una temperatura determinada. El interés de este tipo de materiales está en que, durante el cambio de fase, la temperatura se mantiene constante mientras que el material va absorbiendo energía. Este hecho supone una mayor densidad energética por parte de estos materiales en comparación con cualquier otro. Otro aspecto muy positivo es la menor temperatura a la cual se acumula la energía, consiguiendo por lo tanto unas pérdidas menores. Los cambios de fase pueden ser:

- De gas a líquido, o a la inversa
- De sólido a gas, o a la inversa
- De sólido a líquido, o a la inversa



De los cambios de fase definidos anteriormente, el que requiere una mayor aportación de energía es el de sólido a gas, que resultaría de éste modo la alternativa más interesante, sin embargo, este cambio supone también una variación en el volumen del material, que pasa de ocupar un volumen totalmente definido (en estado sólido) a ocupar un volumen en expansión (en estado gaseoso) que genera unas presiones excesivamente elevadas al módulo de PCM. Por este motivo, el cambio de fase de sólido a gas no es apropiado para ciertas aplicaciones.

Referente al cambio de fase de líquido a gas, el problema de la expansión del volumen del material persiste aun cuando no de manera tan marcada como en el caso anterior. Sin embargo, su aplicación tampoco es apropiada.

Finalmente el cambio de fase de sólido a líquido es el que requiere una menor cantidad de energía, presentando unas variaciones de volumen bastante menores que en los casos anteriores, hecho que permite su uso en distintas aplicaciones.

7. 2. 3.- Almacenamiento térmico asociados a dispositivos de disco Stirling

El sistema de almacenamiento térmico referido a un sistema disco Stirling, asociado a materiales de cambio de fase, PCM en inglés, se puede instalar como un sistema aislado o integrado con un receptor de reflujo. Para ambos casos, la gestión del sistema es una cuestión clave para la correcta regulación de los períodos de almacenamiento y liberación de energía.



En cuanto a los líquidos de trabajo, hay experiencias para el motor Stirling en fluoruro de litio e hidruro de magnesio.

Para la selección del PCM, los factores clave son, entre otros, la temperatura nominal, que en el caso del motor de disco Stirling es alta, situándose alrededor de 500-900 °C, y la capacidad térmica. Hay otros factores: el equilibrio de costes y beneficios, y los criterios técnicos y ambientales, que también deben ser tenidos en cuenta. Por otro lado, el costo depende del propio PCM y también en el intercambiador de calor necesario para la carga y la liberación del sistema.

Del mismo modo, de entre las distintas características técnicas requeridas para este tipo de sustancias, pueden destacarse una la densidad energética alta, una buena transferencia de calor, esto es, una eficiencia elevada, un elevado coeficiente de estabilidad mecánica y química para soportar ciclos de carga y descarga, compatibilidad con otros materiales, una alta reversibilidad de los ciclos de carga y descarga, también conocida como histéresis, bajas pérdidas térmicas y una sencilla gestión del control.

Según la temperatura de los sistemas de almacenamiento térmico, las plantas solares térmicas se clasifican en sistemas activos o pasivos.

- **Sistemas activos:** El intercambio térmico se produce por convección forzada con el material que circula por un intercambiador de calor.

- **Sistemas pasivos:** Hay otro fluido de transferencia de calor que pasa por el tanque de la PCM, para la carga y descarga.



A continuación se ha creído conveniente mostrar una clasificación de los diferentes PCM que pueden ser empleados en los sistemas de almacenamiento de la tecnología de disco Stirling.

| Compound | Fusion T ^a (°C) | Phase change energy (kJ/kg) | Density (kg/m ³) | Specific heat (kJ/kgK) | Thermal conductivity (W/mK) |
|---|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| AlSi ₁₂ | 576 | 560 | 2700 | 1,038 | 160 |
| AlSi ₂₀ | 585 | 460 | n.a. | n.a. | n.a. |
| MgCl ₂ | 714 | 452 | 2140 | n.a. | n.a. |
| 80.5%LiF 19.5%CaF ₂ | 767 | 790 | 2100/2670 / liquid | 1.97/1.84 / liquid | 1.7/5.9 / liquid |
| eutectic | | | | | |
| NaCl | 800 802 | 492 466.7 | 2160 | n.a. | 5 |
| Na ₂ CO ₃ - BaCO ₃ /MgO | 500- 850 | n.a. | 2600 | n.a. | 5 |
| LiF | 850 | 1800 (MJ/m ³) | n.a. | n.a. | n.a. |
| Na ₂ CO ₃ | 854 | 275.7 | 2533 | n.a. | 2 |
| KF | 857 | 452 | 2370 | n.a. | n.a. |
| K ₂ CO ₃ | 897 | 235.8 | 2290 | n.a. | n.a. |

Tabla 9. Clasificación de los diferentes PCM.

Por otro lado, Stirling Energy Systems (SES) [74] e Infinia [20] están trabajando en la integración de los sistemas de almacenamiento térmico en sus dispositivos de disco Stirling. En particular, Infinia ha iniciado un proyecto de almacenamiento térmico, apoyado por el DOE, que implementará en 40-50 sistemas que serán utilizados para la demostración en las instalaciones de Sandia. Como resultado de la investigación, Infinia presentó una patente en 2010 y que se muestra en la imagen situada a continuación [111].

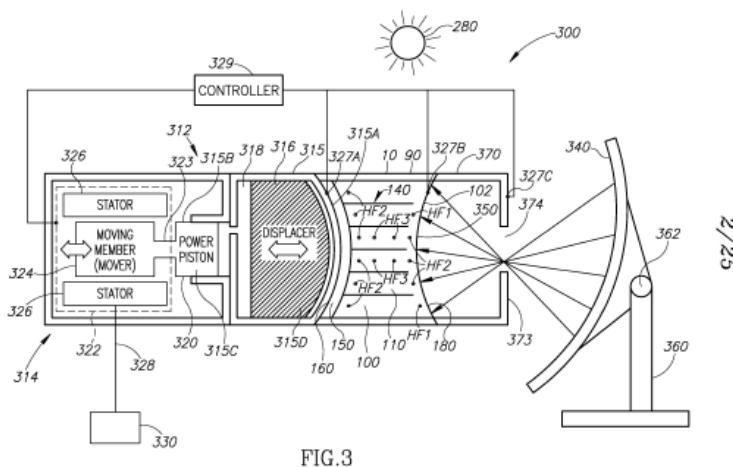


Figura 44. Dispositivo de almacenamiento desarrollado por Infinia

El dispositivo de almacenamiento térmico presentado por Infinia en esta patente consiste en un recipiente con el PCM, que tiene una entrada y una salida para el flujo de calor. Se trata de un receptor de reflujo, de tal manera que a la entrada recibe la energía desde una fuente externa de transporte de energía térmica. Otros elementos encargados de la transferencia del calor, serán los encargados de transmitir la energía almacenada en el PCM al exterior, cuando su uso sea requerido.



La salida del contenedor está conectada directamente al motor de Stirling. El sistema de control es significativamente importante, ya que resulta imprescindible para gestionar los flujos de transferencia de calor a través de la función de los distintos elementos constituyentes del dispositivo. En esta patente, se presenta una amplia información sobre la selección de material que tiene en cuenta una temperatura de cambio de fase alta junto con un alto calor latente de fusión.

Este es el caso de las sales eutécticas, como LiF/NaF/MgF₂, LiF / NaF y NaF / NaCl, o de otros materiales tales como Li, LiOH, LiH, LiF/CaF₂, LiF, NaF, MgF₂ y CaF₂.

En esta patente, el hidruro de litio, LiH se presenta como uno de los PCM más adecuados para el uso de la tecnología del disco Stirling. El LiH tiene una elevada energía específica y disponible en el rango de temperatura de trabajo desde 500 hasta 1000 °C. El fluoruro de litio, LiF tiene también valores adecuados, con la mayor densidad de energía en este rango.

Por otro lado, existen sales eutécticas, como LiF/NaF/MgF₂, con valores similares para la operación en los sistemas de disco Stirling. Sin embargo, LiH y LiF tienen ventajas respecto a la producción y el uso del PCM, debido a razones de peso y seguridad.

El sistema de almacenamiento térmico presentado en esta patente puede operar en combinación con la hibridación de tal manera que hay dos diferentes fuentes de energía de entrada.



7. 3.- Hibridación

7. 3. 1.- Introducción

El uso de la tecnología de disco Stirling como una tecnología viable para aplicaciones comerciales en materia de generación de energía tanto térmica como eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, depende en gran medida de las medidas de desarrollo que sean adoptadas a partir de ahora.

De éste modo, uno de los temas clave es el coste de la energía proporcionada por esta tecnología. En este sentido, resulta fundamental garantizar el funcionamiento de la instalación el mayor tiempo posible. Queda patente entonces la necesidad de que el desarrollo futuro de estas tecnologías, vaya encaminado hacia la superación de la dependencia que presentan con respecto a las condiciones climáticas del medio en el que se encuentran ubicadas.

Así pues, surge la necesidad de hibridar éste tipo de sistemas de modo que otras fuentes de energía puedan ser empleadas alternativamente en combinación con la energía solar, en función de las condiciones climáticas, eliminándose por tanto esa dependencia existente con respecto a las mismas. La hibridación, resulta ser una tecnología con un enorme potencial en la reducción de costes de la tecnología con la más alta eficiencia para la generación de la energía solar.

En éste apartado, se va a realizar un estudio de los sistemas de hibridación destinados a ser implementados en los dispositivos de tecnología disco Stirling. Más información acerca de los criterios de clasificación de éstos sistemas, así como



información relativa a la hibridación en centrales termosolares, esto es, de torre central y de colectores cilindro parabólicos serán ampliadas en el Anexo IV.

Por otro lado, y debido al potencial desarrollo que presentan los combustibles biomasa, junto con su gran adaptabilidad a los dispositivos disco Stirling, se ha creído conveniente la elaboración de un Anexo IV en el cual se desarrollan algunos de los proyectos que se están llevando a cabo en la actualidad en materia de obtención de combustibles biomasa.

7. 3. 2.- Hibridación aplicada a los dispositivos disco Stirling

Los dispositivos de disco Stirling, debido a su alta versatilidad en cuanto a combustibles se refiere, resultan altamente interesantes para el empleo de biomasa debido a que son sistemas cuyo alto potencial reside en aplicaciones destinadas a la generación de energía eléctrica descentralizada, esto es, cerca del lugar de consumo, de modo, que durante aquellos periodos de tiempo, en los cuales resulte imposible el aprovechamiento de la energía solar, o incluso para la producción de energía eléctrica durante la noche, puede ser empleada la biomasa, resultando un combustible natural, inagotable y sobre todo altamente respetuoso con el medio ambiente.

Así pues, en cuanto a la hibridación estudiada en el caso particular de los dispositivos de disco Stirling resulta imprescindible comenzar haciendo una breve revisión de la tecnología.



Así pues, dentro de los dispositivos de disco Stirling pueden diferenciarse dos tipos de receptores, Receptores Directamente Iluminados, DIR, en inglés y Receptores de Reflujo, los cuales van a ser mencionados brevemente por haber sido estudiados en profundidad en apartados anteriores.

- **Receptores Directamente Iluminados, DIR:**

En DIR, la radiación solar incide directamente sobre la superficie que limita con el fluido de trabajo confinado en el motor Stirling, generalmente constituida por un entramado de tubos que forman el intercambiador de calor. El principal inconveniente de DIR resulta ser la falta de uniformidad de la temperatura en la superficie de intercambio, lo que hace que aparezcan tensiones residuales en los materiales, disminuyendo por tanto la durabilidad de los distintos componentes.

Receptores de reflujo:

En los receptores de reflujo, es un fluido de trabajo intermedio, que resulta ser generalmente un compuesto de sodio y/o de potasio, el que transfiere el calor de la fuente de energía al líquido confinado dentro del motor Stirling.

Esta última característica constituye un desarrollo más complejo, pero que por otro lado revierte en algunas ventajas con respecto a la durabilidad y eficiencia del DIR.



Así pues, los proyectos de hibridación para la tecnología de Disco-Stirling se iniciaron en 1981 y han sido desarrollados para los dos tipos de receptores. De éste modo, algunos de los proyectos más importantes y relativamente recientes pueden ser, para los dispositivos que incorporan un DIR, **SAIC / STM Sundish Sistema [116]**, que tuvo lugar entre 1999 y 2000 y **Biodish [117]**, entre 2000 y 2003, mientras que para el Receptor de Reflujo, algunos de los proyectos son, **HYPHIRE [118]** proyecto que fue desarrollado entre 1997 y 2000 y el proyecto llevado a cabo por **Sandia [85 , 119]** entre 1995 y 2002.

Por otro lado, se ha creído conveniente un desarrollo más completo para cada uno de los proyectos mencionados, con el fin de poder estar en condiciones de entender cuál ha sido la evolución de éste tipo de dispositivos con el transcurso del tiempo.

- **SAIC / STM Sundish Sistema (DIR) (1999-2000) [116]:** Instalación de una unidad de disco Stirling en un contexto sanitario para la explotación de biogás, con un tiempo de funcionamiento de 600 horas. El principal problema encontrado fue la suciedad debido a la composición del biogás y la falta de uniformidad de esta composición. De éste modo fue necesaria la implementación de un filtro de control de la composición para adaptar las características de combustión. El receptor constaba de un haz de tubos paralelos delgados, que se encuentran en un cono truncado.

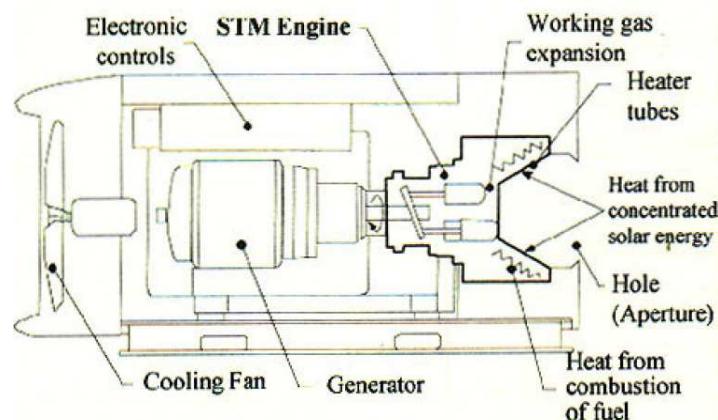


Figura 45. Sistema de SAIC / STM Sundish

- **Biodish (DIR)(2000-2003 [117]):** Receptor de cerámica con forma de cilindro que absorbe la radiación solar en la cara interna y la energía de combustión en la superficie exterior, bien alternativamente o al mismo tiempo. El quemador de combustión era de tipo remolino. El material cerámico empleado fue el carburo de silicio (SiC) reforzado con fibra de carbono para soportar la alta presión interna, que podía ser de hasta 150 bar. El principal inconveniente de este receptor fue la compleja producción y el alto costo que suponía. Para este proyecto se realizó también un análisis económico de viabilidad de una planta con 50 a 100 unidades de disco Stirling con hibridación con biomasa gasificada.



Figura 46. Receptor DIR de Biodish

- **HYPHIRE (Receptor Reflujo)(1997-2000) [118]:** Receptor de tubería de calor de Sodio, con una temperatura de trabajo entre 700 - 850 °C. Se compone de tres superficies de intercambio térmico: superficie interna para la recepción de la energía solar, la superficie con aletas exteriores para la combustión de gas y producción de calor para el motor de Stirling. El sistema podía operar aislada o simultáneamente con ambas fuentes de energía. Fue durante 117 horas en modo de Sol, 92 horas en modo de combustión y 56 horas en modo simultáneo en la Plataforma Solar de Almería, PSA [55].

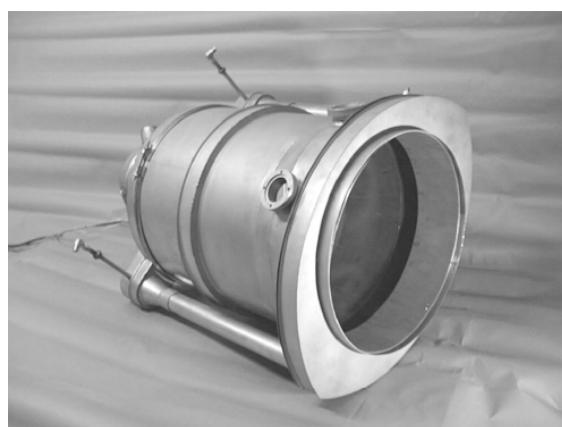


Figura 47. Receptor HYPHIRE.

- **Sandia (Receptor Reflujo)(1995-2002) [85, 119]:** Receptor de tubería de calor de sodio, con una temperatura de trabajo en torno a 750 °C. El sistema de combustión estaba provisto de una grabadora de matriz metálica, que operaba en el modo de absorción de la radiación solar. La superficie de intercambio con los gases de combustión estaba provista de aletas para mejorar la transferencia de calor.

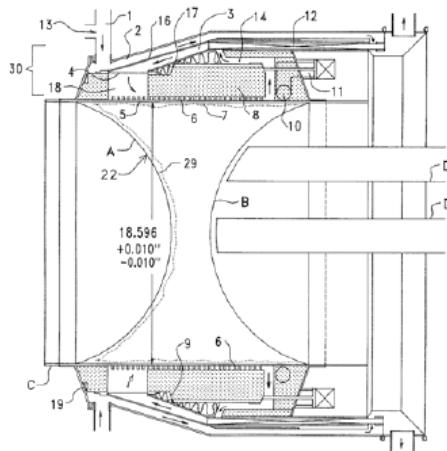


Figura 48. Receptor de Sandia [85].

Por otro lado, los quemadores se clasifican según diferentes criterios en función de las características de combustión que presentan cada uno de ellos. Así pues pueden tenerse en cuenta los criterios que siguen para su clasificación:

- **La fuente de presión:** Determina si el quemador es atmosférico o sobrealimentado.
- **El momento en el que se realiza la mezcla entre el oxidante y el combustible:** Este factor determina si se trata de un quemador de premezcla o no.
- **El modo en que tiene lugar la combustión:** Si la combustión tiene lugar cerca de la superficie del quemador, sin llama de difusión, el quemador se denomina radiante. Así la energía de combustión tiene lugar por la alta temperatura a la que se encuentra el material.



- **El tipo de combustible:** Determina si se trata de un quemador de combustibles gaseosos, o por el contrario de combustibles líquidos o sólidos.

De éste modo, un combustible en estado gaseoso, mejora la mezcla con el oxidante, lo que mejora la combustión, tanto en la liberación de energía y aprovechamiento de la misma como a nivel de emisión de productos residuales.

Por otro lado, un combustible que se encuentre en estado líquido se evaporará antes en la combustión, hecho que sin ninguna duda añade complejidad al sistema. En cuanto a los combustibles sólidos, la combustión completa depende en gran medida del nivel de agregación y el estado en el que se encuentren los mismos. Así pues, la suciedad resulta ser más crítica para los combustibles sólidos, seguidos de los líquidos.

Con el fin de representar las ventajas e inconvenientes que supone el empleo de los diferentes combustibles en función del estado de agregación en el que se encuentren se ha creído conveniente la elaboración de una tabla resumen en la cual plasmar tales diferencias.



| <u>TIPO DE COMBUSTIBLE</u> | <u>VENTAJAS</u> | <u>INCONVENIENTES</u> |
|----------------------------|--|--|
| GAS | <i>Muy buena combustión</i> | <i>Escasa disponibilidad de biomasa en estado gaseoso.</i> |
| LIQUIDO | <i>Muy buena combustión si llega a vaporizarse</i> | <i>Proceso de vaporización y por tanto de combustión altamente dependientes del nivel de suciedad.</i> |
| SOLIDO | <i>Disponibilidad de biomasa en estado sólido</i> | <i>Baja eficiencia en la combustión. Alto nivel de dependencia de la suciedad del medio</i> |

Tabla 10. Resumen de ventajas e inconvenientes de los diferentes combustibles.

- **La geometría del quemador:** Pueden encontrarse quemadores, rectangulares o redondeados, fundamentalmente. Este último es preferido debido a consideraciones de producción y eliminación de curvas que pueden representar los puntos de falla del quemador.
- **Posición geométrica:** El quemador puede encontrarse localizado concéntricamente a la fuente de combustión. Del mismo modo, la forma del quemador determina también el movimiento del fluido en su interior. Por lo tanto, un flujo turbulento puede sobreponerse a un flujo laminar, que es el que



realmente interesa. El nivel de turbulencia influye también en las condiciones de combustión. Existen quemadores que operan con un flujo de baja turbulencia especialmente diseñados para trabajar con una mezcla pobre, una alta eficiencia y un bajo nivel de emisiones al exterior.

- **Los materiales:** El quemador puede ser metálico o de cerámica. Dependiendo de la selección de materiales, el quemador podrá soportar una u otra temperatura máxima de combustión. El quemador de cerámica tiene una mejor estabilidad mecánica, aunque su inconveniente es la fragilidad de almacenamiento térmico.



8.- CONCLUSIONES

Tras la elaboración del presente proyecto, ha quedado patente la necesidad urgente de adoptar un modelo energético diferente del que está siendo empleado en la actualidad. Este nuevo modelo energético debería, con el objetivo de reducir al máximo las emisiones y el impacto medioambiental y ser lo más eficiente posible, estar fundamentado prácticamente en su totalidad en fuentes de energía renovables y siguiendo un modelo descentralizado de generación de energía. Así pues, es mediante la adopción del modelo energético planteado, cuando los dispositivos de disco Stirling desarrollan todo su potencial en materia de generación de energía.

Si se atiende a la necesidad de generación de energía a partir de fuentes renovables, una posibilidad muy interesante resultan ser las centrales termosolares, de colectores cilindro parabólicos, que ya se emplean para la generación masiva de energía eléctrica, y de torre central, todavía en fase de desarrollo, así como las plantaciones de paneles fotovoltaicos. Sin embargo, las primeras mencionadas resultan ser una opción más interesante en éste sentido debido a presentar valores de eficiencia superiores a la tecnología fotovoltaica.

Por otro lado, si se atiende, dentro del nuevo modelo energético planteado, a la generación descentralizada de la energía, resultan especialmente interesantes por su modularidad la tecnología fotovoltaica y la de disco Stirling.

Actualmente, resulta más interesante, para la generación individual de energía eléctrica, la instalación de paneles fotovoltaicos. Esto es debido a que dicha tecnología



se encuentra en un nivel de desarrollo muy superior a la tecnología de disco Stirling, lo que favorece su instalación a pesar de presentar unos valores de eficiencia sensiblemente inferiores.

Sin embargo, es mediante la implantación y desarrollo de sistemas de hibridación y cogeneración, cuando realmente resulta competitiva la tecnología de disco Stirling frente a la fotovoltaica.

De éste modo, mediante el empleo de los sistemas de disco Stirling, se tiene un sistema flexible, que puede funcionar a partir de diversas fuentes de energía renovables, altamente modulable, de modo que fomenta la descentralización de la energía y que presenta los valores de eficiencia más elevados hasta el momento en materia de conversión de energía solar térmica en energía eléctrica, resultando ser, por lo tanto, una alternativa altamente interesante para la generación de energía eléctrica y térmica en un futuro cercano.