



**ESCUELA DE INGENIERIA Y
ARQUITECTURA**
UNIVERSIDAD ZARAGOZA



PROYECTO FIN DE CARRERA

ANEXOS

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 de ANEXOS

ANEXO I: Ampliación motores Stirling	1
1.1.- Tipos de motores Stirling.....	1
1.1.1.- Motor tipo Beta	2
1.1.2.- Motor tipo Alfa	3
1.1.3.- Motor tipo Gamma.....	4
1.1.4.- Motor Ringbom.....	5
1.1.5.- Motor de Pistón Líquido	7
1.1.6.- Motor de Pistón Libre	8
1.2.- Aplicaciones.....	10
1.2.1.- Tecnología de disco Stirling para la generación de electricidad.....	12
1.2.2.- Aplicaciones marítimas.....	14
1.2.3.- Refrigeración.....	15
1.2.4.- Automóviles	18
1.2.5.- Micro – generación (mCHP).....	21
1.3.- Empresas identificadas que fabriquen el motor Stirling	23
1.3.1.- Microgen Engine Corporation	24
1.3.2.- InfiniaCorp	26
1.3.3.- SunPower	27
1.3.4.- Stirling Biopower, Inc	31
1.3.5.- Stirling Technology, Inc	33
1.3.6.- WhisperGen	38
ANEXO II: Ampliación sistemas de cogeneración	42
2.1.- Introducción	42
2.2.- Elementos constitutivos de una planta con sistema de cogeneración.....	42
2.3.- Tecnología en centrales termosolares	44
2.4.- Evolución de la situación de los sistemas de cogeneración en España	45

ANEXO III: Ampliación sistemas de almacenamiento térmico	51
3.1.- Introducción	51
3.2.- Criterios de clasificación	52
3.3.- Tecnología de sales fundidas en centrales termosolares.....	56
3.4.- Estado actual de desarrollo y experiencia práctica en centrales termosolares	60
3.5.- Nuevos sistemas de almacenamiento térmico	65
 ANEXO IV: Ampliación sistemas de hibridación	69
4.1.- Introducción	69
4.2.- Criterios de clasificación de los diferentes dispositivos	70
4.3.- Hibridación Sol – Gas.....	72
4.4.- Proyectos hibridación Sol – Gas en España.....	73
4.5.- Proyectos hibridación Sol – Gas en el mundo	79
4.6.- Hibridación Sol – biomasa.....	85
4.7.- Proyectos hibridación Sol – biomasa en España	85
 ANEXO V: Obtención de combustibles biomasa	92
5.1.- Introducción	92
5.2.- Obtención de combustibles biomasa.....	92

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.wkipatents.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 Sistems, 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/460393455_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-lista-para-su-distribucion-en-italia>
- [105] Gráficas evolución de la cogeneración en España. <http://electro-nikorobin.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/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/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-primeraplantasol-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/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>

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>

Lista de figuras de ANEXOS

Figura 1. Motor Stirling tipo Beta	3
Figura 2. .Motor Stirling tipo Alfa	4
Figura 3. Motor Stirling tipo Gamma	5
Figura 4. Motor Stirling tipo Ringbom	7
Figura 5. Motor Stirling de Pistón Líquido (1 ^a y 2 ^a mitad de su ciclo)	8
Figura 6. Motor Stirling de Pistón Libre	9
Figura 7. Dispositivo disco Stirling de 10 kWe. Alemania	14
Figura 8. Máquina criogénica de oxígeno líquido	16
Figura 9. Sistema micro – CHP de Microgen	23
Figura 10. Motor Stirling de Microgen	25
Figura 11. Motor de Stirling Biopower	33
Figura 12. Motor ST – 5	37
Figura 13. Sistema almacenamiento térmico de Andasol	62
Figura 14. Sistema almacenamiento térmico Gemasolar	63

Lista de tablas deANEXOS

Tabla 1. Tabla recopilación modelos motor Stirling	10
Tabla 2. Comparación de parámetros básicos biomasa /gasoil	98
Tabla 3. Comparativa costes biomasa / gasoil	98

Lista de gráficas de ANEXOS

Gráfica 1. Rendimientos en función de la temperatura alcanzada	17
Gráfica 2. Capacidad de bombeo	38
Gráfica 3. Evolución de la potencia instalada mediante cogeneración (MWe) en España	49
Gráfica 4. Evolución del número de instalaciones de cogeneración (MW) en España	49
Gráfica 5. Evolución del porcentaje de energía generada mediante cogeneración en España	50
Gráfica 6. Demanda de electricidad a lo largo de un día [127]	88



Anexo I: Ampliación motores Stirling

1. 1.- Tipos de motores Stirling

En vista del funcionamiento básico de un motor Stirling anteriormente desarrollado, de los distintos componentes que conforman el mecanismo de un motor Stirling convencional y las diferentes maneras en que pueden ser combinados para su funcionamiento, se hace necesario llevar a cabo una distinción entre las diferentes variantes de éstos motores que existen actualmente, poniendo de manifiesto de éste modo las diferencias tanto constructivas como funcionales que presentan los mismos.

Dichas diferencias podrían resumirse en el número de cilindros y/o pistones que presenta cada motor en particular, en el modo en que se consigue el desplazamiento del fluido a lo largo de las diferentes zonas del motor y por último en la disposición de los elementos que lo conforman como el cigüeñal, la biela, los pistones, etc...., dando lugar, de éste modo, a un ejemplar más o menos complejo estructuralmente.

De entre todos los modelos más comunes del motor Stirling se ha creído conveniente estudiar en profundidad tres de ellos en concreto, a saber, motor tipo Beta, que por otro lado resulta ser la disposición que adoptaba la patente original de Robert Stirling, motor tipo Alfa y por último motor tipo Gamma, ya que a partir de los mismos se desarrollarán las demás variaciones, que estarán sustentadas por los principios de funcionamiento presentes en estos tres modelos base.



1.1.1.- Motor tipo Beta

El motor original de Stirling, diseñado por Robert Stirling en 1816, tal y como ya se ha comentado, era de tipo Beta. Esta variante del motor Stirling presenta dos grandes diferencias con respecto al tipo Alfa, que será explicado a continuación, que son la existencia de un único cilindro y la necesidad de alojar en su interior un desplazador, inexistente en el otro modelo.

Así pues, se trata de una variante que consta de un único cilindro, en el cual en un extremo se encuentra el foco caliente, mientras que en el extremo opuesto lo hace el foco frío. En el interior del cilindro se ubica el desplazador cuya misión es hacer circular el fluido de la zona fría a la caliente y viceversa. Esto es posible, como ya se ha comentado con anterioridad, debido a que el diámetro del desplazador es unas décimas de milímetro inferior al del cilindro, por lo tanto y gracias al desplazamiento que realiza el desplazador se fuerza al fluido a circular entre ambos cuerpos. Esta configuración en los motores tipo Beta tiene lugar cuando se trata de motores de reducido tamaño, y en los cuales no es rentable la instalación de un regenerador que mejore el rendimiento del mismo.

Sin embargo en los motores de mayor tamaño se puede encontrar un regenerador externo por el que debe pasar el aire en su camino de la zona fría a la caliente y viceversa.

Concéntrico con el desplazador, está situado el pistón de potencia. Mediante un cigüeñal el movimiento del pistón y el desplazador están desfasados 90 grados, lo que permite que el motor funcione.

Desde el punto de vista termodinámico es el motor más eficaz, pero su construcción es complicada ya que el pistón debe de tener dos bielas y permitir el paso del vástago que mueve el desplazador a través de la superficie del pistón.

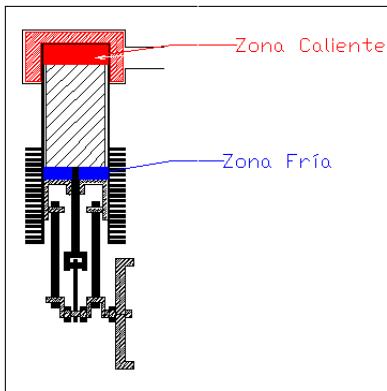


Figura 1. Motor Stirling tipo Beta.

1.1.2.- Motor tipo Alfa

El motor Stirling tipo Alfa fue diseñado por Rider en Estados Unidos. Este motor no utiliza desplazador como ocurre en la patente original de Stirling que sí que lo integra, pero desde el punto de vista termodinámico el funcionamiento es similar.

Consta de dos cilindros independientes conectados entre sí por un tubo en el que se sitúa el regenerador que almacena y cede el calor. En cada uno de los cilindros hay un pistón que se mueve 90 grados desfasado respecto al otro. Ambos pistones están unidos a un único cigüeñal, lo que confiere al motor una relación potencia/volumen bastante alta. En uno de los cilindros se eleva la temperatura, mientras que en el otro se enfriá mediante aletas o agua, de éste modo, y gracias al desfase entre los dos pistones, se consigue que el aire circule de un cilindro a otro calentándose, enfriándose y realizando el trabajo que permite el funcionamiento del motor.

Se trata de un motor bastante sencillo desde el punto de vista funcional y constructivo, sin embargo, resulta bastante complicado asegurar la estanqueidad del fluido a lo largo de su recorrido, resultando especialmente problemáticas en términos de fugas las zonas próximas al foco caliente.

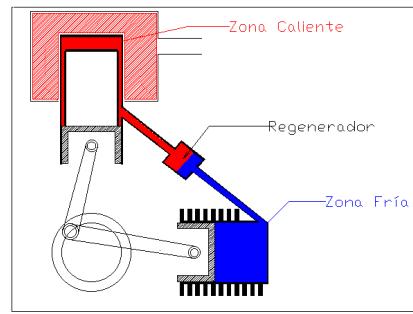


Figura 2. .Motor Stirling tipo Alfa.

1.1. 3.- Motor tipo Gamma

El motor Stirling tipo Gamma es un motor derivado directamente del motor tipo Beta, con la única salvedad de que es más sencillo de construir. Consta de dos cilindros separados en uno de los cuales se sitúa el desplazador y en otro el pistón de potencia.

Los sistemas para enfriar y calentar son idénticos a los del tipo beta. Aquí el pistón y el desplazador también deben de moverse desfasados 90 grados, lo cual se consigue mediante el cigüeñal adecuado, siendo de éste modo más sencilla su construcción, ya que en el tipo Beta, al encontrarse pistón y desplazador, ambos en un mismo cilindro, el vástago de unión del desplazador con el cigüeñal debía hacerse pasar a través del pistón.

Desde el punto de vista termodinámico es menos eficaz que el tipo Beta , puesto que la expansión de trabajo se realiza en su totalidad a menor temperatura.

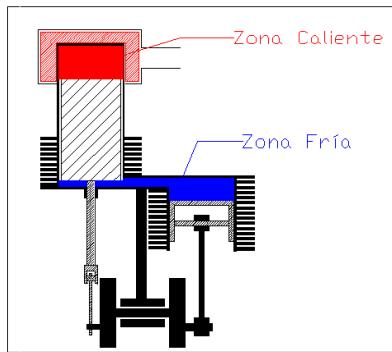


Figura 3. Motor Stirling tipo Gamma.

Una vez llevado a cabo el estudio de las tres variantes fundamentales del motor Stirling y establecidas las bases de su funcionamiento, se va a proceder al desarrollo de tres variantes adicionales de éste tipo de motor, a saber, motor tipo Ringbom, motor de Pistón Líquido y motor de Pistón Libre, con el objetivo de completar la clasificación de todas y cada una de las configuraciones de estos dispositivos. Señalar que el desarrollo de estas tres últimas posibilidades fue impulsado con el objetivo de simplificar al máximo el movimiento del pistón y del desplazador.

1.1.4.- Motor Ringbom

En 1905 Ossian Ringbom patentó un motor cuyo desplazador se movía por una combinación de las variaciones internas de la presión en el motor y la fuerza de la gravedad. La simplicidad de este mecanismo es asombrosa aunque en su tiempo no tuvo gran éxito puesto que al necesitar de la fuerza de la gravedad para mover el desplazador, la velocidad del motor no era muy elevada.



Posteriormente los investigadores que trabajaron con este tipo de motor, descubrieron que con pequeñas modificaciones sobre la patente original de Ringbom podía realizarse un motor igual de sencillo y a su vez tan rápido como cualquiera de los tipos clásicos de motores de Stirling.

Se trata de un motor tipo Gamma en el que el vástago del desplazador tiene un diámetro mayor que en el motor con doble cigüeñal. Dicho vástago no tiene ninguna conexión mecánica con el cigüeñal y permite al desplazador moverse libremente, estando dicho movimiento únicamente limitado por dos juntas tóricas de material elástico que amortiguan su choque al alcanzar los punto muerto inferior y punto muerto superior, respectivamente.

La base de funcionamiento de este tipo de motor está en la relación entre el diámetro del vástago del desplazador (A_r) y el diámetro del desplazador (A_d). Si la relación A_r/A_d es elevada, en torno a 0,5 - 0,6, el motor girara muy rápido pero necesitará mayor diferencia de temperatura entre el foco frío y el caliente (ΔT). Por el contrario, si la relación A_r/A_d es baja, de 0,2 - 0,3, la velocidad de giro del motor será más lenta pero no necesitará una ΔT elevada para su correcto funcionamiento.

Como dato cuantitativo necesario para tener una idea clara de la relación que se ha de tener entre ΔT , el tipo de motor empleado y el ratio de diámetros necesario, se tiene que, para un ΔT del orden de 300°C y mediante el empleo de un motor con refrigeración por aire y calentado por un mechero de alcohol, el ratio adecuado A_r/A_d suele ser del orden de 0,4.

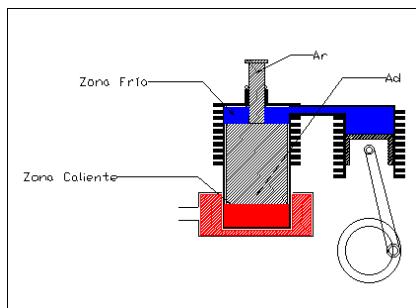


Figura 4. Motor Stirling tipo Ringbom.

1.1.5.- Motor de Pistón Líquido

El motor de pistón líquido es una variable del motor Stirling en la que el pistón y el desplazador han sido sustituidos por un líquido. En éste caso, el motor está formado por dos tubos en forma de “U” llenos de líquido, el de la izquierda actúa como desplazador y el de la derecha actúa como pistón de potencia.

Para la comprensión del funcionamiento de éste tipo de motor, es necesario tener en cuenta que el líquido en el tubo de la izquierda está oscilando, de modo, que una vez el nivel del líquido alcanzado la parte superior en la zona fría, todo el aire se encuentra situado en la zona caliente, por lo que la presión del conjunto aumentará y el líquido en el tubo de potencia ascenderá por la rama derecha.

En la siguiente mitad del período el líquido oscilará en el sentido contrario en el desplazador y por lo tanto alcanzará el nivel superior en la zona caliente. Entonces, todo el aire estará en la zona fría con lo que la presión habrá disminuido y el líquido en el tubo de potencia ascenderá por la rama izquierda.

Para que el conjunto funcione correctamente es necesario que la frecuencia de oscilación del tubo desplazador y del tubo de potencia sea la misma, ya que de lo contrario se perderá el desfase de 90 grados que debe de existir entre el movimiento del desplazador y el del pistón de todo motor Stirling.

La realización práctica del motor de pistón líquido exige pues unos cálculos complicados en el diseño de la forma y las longitudes de los tubos desplazador y de potencia, añadiendo en algunos casos un tercer tubo llamado sintonizador que permite que el conjunto alcance una frecuencia de resonancia que permita su funcionamiento continuo.

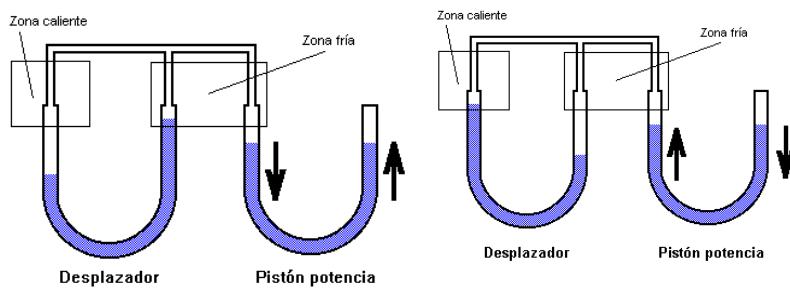


Figura 5. Motor Stirling de Pistón Líquido (1^a y 2^a mitad de su ciclo).

1.1.6.- Motor de Pistón Libre

Cuando no se requiere obtener la potencia en un eje giratorio, si no que por el contrario, lo que se desea es un movimiento rectilíneo y alternativo, el motor de ciclo Stirling se puede simplificar mucho estructuralmente manteniéndose idénticos los principios de funcionamiento que se explicaban en anteriores variaciones del motor.

Este modelo de motor Stirling sería muy apropiado para accionar el mecanismo tanto de un compresor de aire, como una bomba de agua o incluso un generador eléctrico, ya que en cualquiera de las tres situaciones mencionadas se requiere un movimiento lineal y alternativo en el pistón que es justamente el tipo de movimiento obtenido con esta variante del motor Stirling, en la cual no solamente el desplazador tiene un movimiento rectilíneo y alternativo, si no que, en éste caso en concreto, el pistón también lo tiene, transmitiendo de éste modo el movimiento deseado.

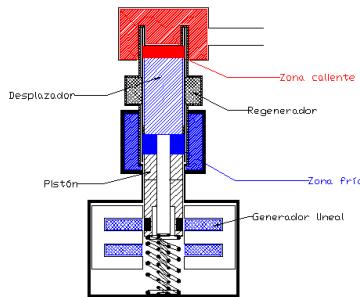


Figura 6. Motor Stirling de Pistón Libre.

A continuación se recogen a modo de recopilación en una tabla los diferentes modelos de motor Stirling desarrollados:

Motor tipo Alfa	Motor tipo Beta	Motor tipo Gamma
Motor tipo Ringbom	Motor de Pistón Líquido	Motor de Pistón Libre

Tabla 1. Tabla recopilación modelos motor Stirling.

1. 2.- Aplicaciones

Conviene comenzar éste apartado realizando una breve descripción acerca de las diferentes aplicaciones en las que ha sido empleado el motor Stirling desde su invención, teniendo en cuenta para ello tanto las necesidades de la época como el propio estado de desarrollo del motor, para más adelante, pasar a desarrollar cada una de ellas en detalle.



Desde el momento de su invención, en 1816, hasta finales de siglo XIX, resultó ser un potente competidor de la máquina de vapor, único objetivo, por otro lado, por parte de su inventor, Robert Stirling, quien consideraba como una máquina altamente peligrosa e ineficaz a la máquina de vapor.

Por otro lado, durante la segunda Guerra Mundial, y tal y como se desarrolla algunas líneas más adelante, fueron los Laboratorios Philips de Holanda [1] quienes realizaron importantes avances en el desarrollo de éste motor, encaminando el mismo hacia aplicaciones orientadas a tratamientos criogénicos, para los cuales, actualmente sigue siendo una herramienta fundamental el motor Stirling.

Más adelante, en torno al año 1960, se estudió el motor Stirling como una alternativa para proveer de energía eléctrica en naves espaciales. También se investigó acerca de su posible implementación en automóviles como mecanismo propulsor mediante algunos prototipos, aunque ésta iniciativa no tuvo éxito, por diferentes cuestiones como más adelante se estudia. Sin embargo, en la actualidad, éste tipo de motores representan una alternativa más que viable a los motores de combustión interna en los automóviles híbridos en serie.

Sí que tuvo éxito, sin embargo su implementación en embarcaciones náuticas desde 1980, de modo que, en la actualidad, los nuevos submarinos japoneses están siendo equipados con motores de éste tipo.



Por otro lado, una de las aplicaciones que gozan de mayor auge para la implementación de los motores Stirling constituyen la tecnología conocida como micro – generación (mCHP), mediante la cual puede generarse simultáneamente energía eléctrica y energía térmica para el consumo directo en los hogares de los usuarios.

Sin embargo, la aplicación que actualmente presenta el mayor potencial de desarrollo con ésta tecnología es la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía solar. Esto se consigue gracias a la tecnología de disco Stirling, que mediante la concentración de la radiación solar en el foco caliente del motor Stirling, es capaz de generar energía eléctrica. De éste modo, el motor Stirling se define como el elemento constituyente más importante de la tecnología de disco Stirling, que resulta ser uno de los mayores recursos tecnológicos en materia de aprovechamiento de las energías no perecederas, siendo, en particular, enormemente rentable su empleo en lugares aislados a los que resulta prácticamente imposible hacer llegar la energía eléctrica.

1.2.1.- Tecnología disco Stirling para la generación de electricidad

La tecnología de disco Stirling es el principal objeto de estudio del presente proyecto. Ahora simplemente se va a tratar de transmitir una idea general de lo que representa el desarrollo de ésta tecnología, sin embargo, en páginas venideras, se entrará a desarrollar en profundidad el contenido de éste apartado.



Se trata de una tecnología relativamente reciente y para la cual se están comenzando a destinar recursos económicos y materiales con el fin de desarrollar al máximo estos dispositivos, explotando todo su potencial.

Esto es debido, a que actualmente, a pesar de resultar ser una tecnología con gran potencial de desarrollo y una alternativa más que viable a los combustibles fósiles como fuente de generación de energía, en la actualidad, no resulta un sistema competitivo con respecto a los sistemas fotovoltaicos, debido al desarrollo tecnológico de éstos últimos. Si en cambio resulta una tecnología competitiva en éste sentido si se hibrida para la generación alternativa mediante energía solar y biomasa, para lo cual hace falta una elevada inversión económica y material en I+D. Todo esto será convenientemente desarrollado más adelante.

El sistema concentrador de radiación solar disco Stirling está compuesto por un concentrador solar de alta reflectividad, por un receptor solar y por un motor Stirling que se acopla a un alternador. El funcionamiento consiste en el calentamiento de un fluido localizado en el receptor hasta una temperatura entorno a los 750 °C. Esta energía es utilizada para la generación de energía por el motor. Con el fin de obtener un rendimiento óptimo en su ciclo de funcionamiento, el sistema debe estar provisto de la tecnología adecuada para realizar un seguimiento de la posición del sol en dos ejes y de modo completamente automático.



Figura 7. Dispositivo disco Stirling de 10 kWe. Alemania.

La principal ventaja que presenta éste tipo de tecnología basada en los concentradores solares disco Stirling, reside en que resultan ser sistemas con un rendimiento que llega hasta valores pico del 30 %, estando situado su valor promedio en torno al 26 %. Este hecho, junto a la ausencia de contaminación tanto acústica como química, puesto que no tiene lugar ningún tipo de explosión en su ciclo de funcionamiento y la realidad de ser unidades autónomas generadoras de electricidad hace que resulte ser uno de los sistemas con mayor potencial y capacidad de desarrollo en un futuro próximo.

1.2.2.- Aplicaciones marítimas

Los motores de tipo Stirling han sido también empleados en embarcaciones náuticas, como buques, submarinos y yates, bien como propulsores o bien como motores de apoyo para la generación de energía eléctrica empleada por las baterías de los mismos.



El constructor de barcos sueco Kockums [2], diseñó hacia 1980 tres submarinos Clase Gotland para la Armada Real de Suecia que fueron equipados cada uno de ellos con un motor Stirling para auxiliar a los clásicos de combustión interna empleados en el accionamiento de generadores eléctricos.

Así mismo el motor Stirling fue un término clave en la instauración de los nuevos sistemas de abastecimiento de aire para submarinos AIP (air independent propulsión) que dotaba de mayor autonomía a los navíos en los que eran instalados, llegando a alcanzar valores de 14 días de autonomía para una nave de 1500 toneladas que navegue a una velocidad promedio de 9 km/h.

Así mismo, los nuevos submarinos Japoneses están equipados con motores Stirling. La primera nave de ésta clase, el Soryu [3], fue lanzada el 5 de Diciembre del 2007 y entró en operación durante el año 2009.

1.2.3.- Refrigeración

Una de las características más relevantes del motor Stirling, consiste en que se trata de un motor reversible, es decir, puede ser usado como motor aplicándole calor de forma que genera movimiento, o puede ser usado como máquina, consiguiendo extraer calor de un habitáculo, por ejemplo, cuando le es suministrada una energía externa en forma de movimiento generada por un motor exterior. De éste modo, con un diseño adecuado del motor, pueden conseguirse alcanzar temperaturas de 10 K, es decir, -263 °C, de modo que resultan ser realmente útiles en aplicaciones de criogenia.

Como ya se ha comentado anteriormente, los motores Stirling, no solo pueden trabajar como motor entre dos focos a distinta temperatura, sino también como bomba de calor transfiriendo calor del foco frío al caliente.

En torno al año 1950, Philips [1] desarrolló un refrigerador basado en el ciclo de Stirling para la producción de Aire Líquido. El negocio de criogenia de Philips se desarrolló hasta que se independizó de la casa matriz en el año 1990, constituyéndose como la empresa Stirling Cryogenics & Refrigeration BV [4], radicada en Holanda y que a día de hoy continua comercializando sus productos basados en la tecnología del motor Stirling implementada en máquinas criogénicas como la que puede observarse en la siguiente figura.



Figura 8. Máquina criogénica de oxígeno líquido.

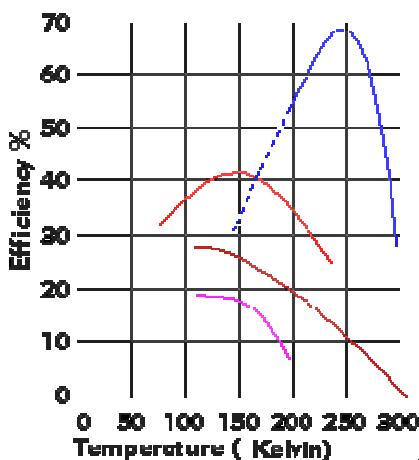
Cada máquina está siempre diseñada para obtener el mayor rendimiento posible para aquella función para la que se ideó, por lo cual no siempre es posible utilizar una maquina Stirling diseñada como motor para refrigeración. Sin embargo, la utilización del ciclo de Stirling para refrigeración es una posibilidad más.

Se podrían diseñar maquinas que funcionaran en ambos sentidos para climatizar viviendas o locales, actuando como una bomba de calor en invierno y como aire acondicionado en verano.

Resulta ser un detalle determinante en éste aspecto, que uno de los usos con mayor consistencia comercial haya sido precisamente en refrigeración criogénica, aun cuando se diseñara inicialmente como máquina generadora de trabajo.

Es cierto, que actualmente, el ciclo de Stirling no es competitivo con los ciclos habituales en refrigeración, sin embargo cuando la exigencia es de temperaturas a obtener desciende por debajo de los 40°C bajo cero, 233°K, aproximadamente, entonces tiene una viabilidad demostrada comercialmente, como ya se ha explicado en líneas anteriores.

Finalmente, aquí se muestra una gráfica donde se comparan los rendimientos de distintos procesos de refrigeración según la temperatura a alcanzar.



Gráfica 1. Rendimientos en función de la temperatura alcanzada.



Cabe indicar para una correcta interpretación del gráfico que la línea azul perteneciente al mismo corresponde a un proceso de evaporación, la línea naranja lo hace a un ciclo Stirling, la línea granate corresponde al ciclo de Claude y finalmente, la línea rosa marca los resultados obtenidos mediante el método de Joule Thomson.

Algunas compañías relacionadas con el empleo de la tecnología de motor Stirling para la producción de sistemas de refrigeración pueden ser Globalcooling [5], empresa estadounidense, TwinBird Corporation [6], con origen en Japón, PennState [7], empresa con sede también en EE. UU y Polo - Tech [8], con sedes en Taiwan y China.

1.2.4.- Automóviles

El intento de implementación del motor Stirling en la ingeniería del automóvil ha venido guiado por dos características intrínsecas a éste tipo de motores como lo son, por un lado, el alto rendimiento que presentan, siendo un rendimiento próximo al ideal, perteneciente al ciclo de Carnot. Por otro lado el hecho de ser motores que emiten cero emisiones al exterior, debido a funcionar gracias a un circuito cerrado y en los cuales la elevada temperatura necesaria para su funcionamiento en el foco caliente no ha de ser necesariamente obtenida mediante la combustión de recursos fósiles, ya que al tratarse de un motor de combustión externa, puede seleccionarse la fuente de calor o combustible empleado.

Además, cabe resaltar que se trata de motores con un número muy inferior de piezas móviles al que pueden encontrarse en los actuales motores de combustión interna, de modo que puede garantizarse una viabilidad superior a la de éstos aun siendo



necesario un mantenimiento mucho menor. Así mismo resulta ser un motor que aporta gran confortabilidad en la conducción del ocupante gracias al bajo nivel de ruido y vibraciones que genera en su funcionamiento.

Por otro lado, y a pesar de las ventajas ya mencionadas en párrafos anteriores, actualmente, los motores Stirling presentan ciertas limitaciones que no los hacen adecuados para funcionar como propulsores individuales de cualquier automóvil. Tres son los principales inconvenientes a destacar.

Por un lado, presentan una potencia específica demasiado pequeña, es decir, serían necesarios motores excesivamente grandes para paliar las necesidades de potencias que un conductor habitual puede pretender demandar a su vehículo.

Por otro lado, la implementación de éste tipo de motores en un automóvil implicaría unas necesidades de refrigeración mucho mayores que las que se pueden encontrar actualmente, siendo necesarios, por tanto, radiadores de gran tamaño, que de ningún modo resultan prácticos a la hora de ser implementados en un utilitario.

Finalmente, es necesario señalar, que el encendido de los motores Stirling no es instantáneo, esto es, no es posible accionar el interruptor del vehículo y pretender partir en él del inmediato, debido a la necesidad de un largo tiempo de encendido y apagado, como ya se había comentado. Esta es sin duda, una de los mayores impedimentos que presenta la implantación de ésta tecnología.



Sin embargo, lo que es una desventaja se convierte en una ventaja si se plantea el empleo de éstos motores en híbridos serie [9]. En éste caso, el motor no propulsa en vehículo, sino que acciona un generador eléctrico, por lo cual se pueden diseñar ambos para que funcionen en condiciones óptimas (una vez pasado el proceso de arranque y calentamiento).

La potencia necesaria en este caso dista de la de un coche convencional. En estos, el motor debe tener una reserva de potencia disponible para poder acelerar, por lo que toda esa potencia de “caballería” que se vende al anunciar los vehículos está descansando más del 90 % del tiempo.

En los híbridos serie esa potencia extra tiene que estar presente en el motor eléctrico, no en el térmico. Este solo debe proporcionar la energía para recargar las baterías para los picos de consumo en los momentos en que sobra energía (cuestas abajo, velocidad de crucero en llano, frenadas, etc....).

Es por ello que para tener un uso comparable, es suficiente un motor con una potencia del 20-30 % de la que nos venden. Dicho de otra manera, el motor debe estar funcionando siempre en la media de la energía necesaria, y no necesita tener potencia adicional para los picos. Como consecuencia de lo anterior, es necesario un motor más pequeño, más ligero y con menores necesidades de refrigeración, lo cual facilita su integración en el volumen del vehículo. Además estará funcionando en condiciones de máximo rendimiento, mejorando los consumos globales.



Estas últimas, representarían las condiciones ideales para un motor Stirling. Como ya se ha dejando intuir anteriormente, para el propietario, tendría ventajas adicionales como menores vibraciones y ruidos, junto con un menor mantenimiento por desgaste derivado. El mayor rendimiento repercutiría en menores consumos para el mismo uso y por tanto de menores costes operativos del vehículo. Es en este momento donde se abre una ventana de oportunidad para los motores Stirling en el mundo de la automoción.

1.2.5.- Micro – generación (mCHP)

La producción combinada de calor y electricidad CHP (Combined Heat and Power), es la producción simultánea de calor útil y electricidad procedentes de una sola fuente.

Esta tecnología fundamentada en aparatos destinados para la calefacción doméstica incorpora motores Stirling adaptados con el fin de aprovechar el calor residual que no puede ser aprovechado para la calefacción del hogar o del Agua Corriente Sanitaria (ACS) y generar a partir del mismo, energía eléctrica que puede ser directamente consumida por los usuarios.

La cogeneración a gran escala, referida mayoritariamente a aplicaciones industriales se ha venido empleando desde hace ya algún tiempo, sin embargo, lo que resulta realmente innovador es la micro – cogeneración o micro – generación aplicada al hogar, mCHP.



El término micro – generación o mCHP, hace referencia a la producción a pequeña escala de gas y/o electricidad procedente de una fuente baja en carbono para los distintos edificios comerciales, apartamentos y casas individuales. Estas unidades cumplen con la demanda de calefacción y agua caliente, mientras que suministran electricidad para complementar o incluso sustituir a la red eléctrica general. Las tecnologías de micro – generación incluyen, entre otras, la energía solar, bombas de calor, biomasa, micro CHP y celdas de combustible a pequeña escala.

Este sistema constituye el pilar fundamental de lo que se conoce como generación descentralizada de la energía, según la cual, los sistemas energéticos sostenibles y descentralizados, producen menos emisiones de carbono, son más baratos e implican menos dependencia de las importaciones de combustible. Así mismo, mediante el desarrollo de ésta innovadora política de generación de energía se crearán más puesto de trabajo, otorgando por tanto mayor poder a las comunidades locales. Los sistemas descentralizados resultan ser más seguros y eficientes que con los que actualmente se cuenta en la producción de energía. Del mismo modo la instalación de aparatos mCHP en edificios nuevos o ya existentes resulta ser más rentable y menos perturbadora en comparación con otras tecnologías renovables y de bajo carbono.

Por último y a modo de resumen de las características señaladas pertenecientes a ésta tecnología, sería interesante recordar tres de ellas en particular, a saber el ahorro económico que redunda directamente en la economía del cliente debido a la reducción de la electricidad importada y con la venta de excedentes de electricidad a la red, la significativa reducción tanto de emisiones de carbono como de pérdidas del sistema asociadas con la producción de la energía central y por último el aumento de la

seguridad del suministro por reducir la dependencia de la producción de energía centralizada.

Algunas empresas relacionadas con la producción de dispositivos fundamentados en la tecnología mCHP son Microgen Engine Corporation [10], Baxi Ecogen [11] y E. On [12], las tres con sede en Reino Unido y por otro lado, WhisperGen [13], procedente de Nueva Zelanda.

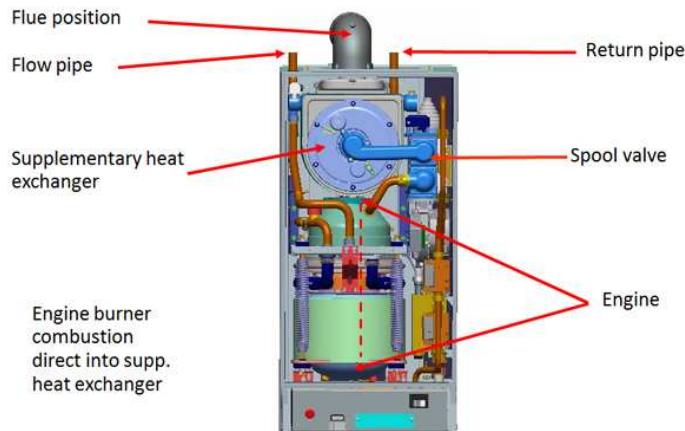


Figura 9. Sistema micro – CHP de Microgen

1.3.- Empresas identificadas que fabriquen el motor Stirling

Actualmente, existe un elevado número de empresas involucradas en el desarrollo de los motores de tipo Stirling tanto para su inserción en aplicaciones de tipo automovilístico, naval, aeroespacial, etc... como para su implementación en diferentes tecnologías presentes en el mercado, tales como la cogeneración de energía, la micro – cogeneración de energía, la criogenia, etc....



En éste apartado, se va a hacer un repaso acerca de las principales empresas que se dedican a la producción del motor Stirling con aplicaciones de diversos tipos en general, dejando las aplicaciones prácticas fundamentadas en la tecnología de disco Stirling para un apartado individual, que se desarrollará más adelante.

Para el desarrollo de éste apartado se ha empleado internet como fuente principal de información, buscando información acerca de las empresas que producen en la actualidad éste tipo de tecnología [14].

1.3.1.- Microgen Engine Corporation

• INFORMACION GENERAL:

Microgen Engine Corporation [10], comenzó su evolución en el año 1995, y su historia data de una continua evolución en materia de producción de motores de tipo Stirling, tanto para ser implementados en la propia tecnología de mCHP que desarrolla como para ser distribuidos a otras empresas para su uso en distintas aplicaciones. Se trata de una empresa que tiene sucursales tanto en Holanda como en Reino Unido y China y de la cual tienen participación numerosas empresas a las que distribuye sus motores. Entre las mismas, se podría destacar la participación de Innova Technology Solutions [15] (6.26 %), Vaillant [16] (1.5 %), Creator Navien [17] (6.36 %), Viessmann [18] (42.19 %) y BDR Thermea [19] (42.19 %).

• MOTOR STIRLING:

Presentó su primer prototipo en el año 1997, con el cual se alcanzó una potencia de 300 We y desde entonces no ha cesado de introducir en el mercado continuas

innovaciones, siendo en el año 2010, cuando, junto con Innova [15], empresa líder en producción de la tecnología disco Stirling y a la cual proporciona los motores Stirling necesarios en la misma, presentó Trinum, un sistema de disco Stirling que será estudiado más adelante y que desarrolla 1kWe de potencia eléctrica y 3 kWt de potencia térmica.



Figura 10. Motor Stirling de Microgen

- **APLICACIONES:**

Actualmente, la cartera de Microgen, está centrada en el desarrollo de aparatos destinados a calefacción doméstica de alta eficiencia, como calderas de condensación, que incorporan un motor de tipo Stirling para su funcionamiento. Estas calderas presentan la misma funcionalidad y ventajas de las calderas de condensación modernas, pero con el valor añadido de la producción de electricidad que las convierten en una atractiva alternativa.

Del mismo modo, y tal y como se ha adelantado anteriormente, los motores Stirling desarrollados por Microgen son implementados por Innova en sus dispositivos de disco Stirling, como Trinum, tecnología para la cual se ha reservado un apartado en particular y que será estudiada convenientemente en apartados venideros.



1.3.2.- InfiniaCorp

- **INFORMACION GENERAL:**

InfiniaCorp [20] 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, es una empresa privada con el apoyo significativo de GLG Partners, Vulcari Capital, Captial de Wexford, Idealab, Equus y Energía Power Play [20]. Por otro lado, además, Infinia cuenta con sedes en Madrid, Tokio, Nueva Delhi, Los Angeles y Albuquerque.

- **MOTOR STIRLING:**

Así pues, Infinia diseña generadores de tipo Stirling de modo que son capaces de proporcionar la energía requerida en cada situación de forma extremadamente silenciosa, resultando unos motores duraderos, altamente económicos, ecológicos y que carecen de ningún tipo de mantenimiento. Esto es debido al empleo de sellaciones líquidas que hacen de sus diseños estructuras herméticamente perfectas, evitando así fugas del fluido de trabajo, helio.

De éste modo los motores diseñados por la marca resultan ser altamente robustos, debido a que ninguno de los componentes que lo forman limitan su vida de algún modo, siendo por tanto su vida útil media de 25 años.



Cabe señalar que todas las características aquí señaladas han sido justificadas mediante exhaustivas pruebas ante organismos tales como la NASA, el Departamento de Energía de los EE. UU, DOE y el Departamento de Defensa de los EE. UU, DOD.

- **APLICACIONES:**

Entre las diversas aplicaciones para las cuales son requeridos los motores diseñados por Infinia se encuentran las destinadas a actividades criogénicas, manteniendo del mismo modo las características intrínsecas a los modelos que antes se comentaban o también como componente fundamental de la tecnología de disco Stirling, tecnología que produce Infinia y la cual se desarrollará más adelante.

1.3.3.- SunPower

- **INFORMACION GENERAL:**

SunPower [21] es una empresa líder mundial en motores de pistón libre Stirling, refrigeradores y compresores lineales. La empresa fue constituida en 1974 por William Beale, y desde entonces se ha mantenido como una empresa privada, dando lugar al establecimiento de 39 patentes solamente en EE. UU además de 97 patentes extranjeras relacionadas.

Como proveedor de tecnología avanzada que se especializa en tecnología de Stirling, SunPower proporciona una amplia gama de servicios de investigación y desarrollo a clientes tanto comerciales como gubernamentales. Por otro lado, SunPower ofrece una amplia gama de servicios a los consumidores industriales, laboratorios educativos y a los clientes del gobierno. Así mismo, actualmente, se encuentra en



proceso de búsqueda de socios para el desarrollo de productos y oportunidades de comercialización de los mismos.

- **MOTOR STIRLING:**

SunPower, se especializa en el desarrollo de los motores Stirling, los cuales integra en algunas de sus aplicaciones, entre las que destacan las destinadas a sistemas de refrigeración criogénicos y compresores lineales integrados en soluciones de eficiencia energética altamente respetuosos con el medio ambiente. En un principio se va a comenzar por el estudio de los motores Stirling que desarrolla para finalmente terminar con el de las aplicaciones a las cuales va destinada su producción.

Se trata de una gama de motores excepcionalmente silenciosa, libre de mantenimiento y con una elevada vida útil, que abarca potencias comprendidas entre los 35 We hasta motores que alcanzan los 7.5 kWe de potencia eléctrica. Así mismo resulta interesante resaltar que SunPower ha realizado pruebas con diferentes tipos de combustibles para elevar la temperatura del foco caliente de sus motores, entre los que se encuentran biomasa, combustibles fósiles tanto líquidos como gaseosos, concentradores solares y tubos de calor.

- **APLICACIONES:**

Las aplicaciones incluyen entre otros, unidades de refrigeración de cogeneración, generadores eléctricos portátiles, dispositivos médicos y dispositivos de detección nuclear y de materiales. A continuación se van a desarrollar dos de las aplicaciones que más importancia tienen en el campo de la tecnología de motores Stirling y que incorporan motores diseñados y producidos por la propia empresa.



- **Sistemas de refrigeración criogénicos:**

SunPower es el principal proveedor de motores Stirling destinados a una gama de productos criogénicos desarrollados por la empresa CryoTel [22] que son empleados en aplicaciones médicas, sensores, telecomunicaciones y tecnologías farmacéuticas.

SunPower comenzó a desarrollar productos compactos destinados a la criogenia que integraban motores Stirling a finales de 1980. SunPower introdujo el primer modelo, el M77, en 1992 y vendió más de 150 unidades a numerosos clientes. Por otro lado, el cryocooler M77, desarrollado como un encargo de la NASA fue puesto en órbita en el satélite RHESSI en Febrero de 2002.

En respuesta a las necesidades de los clientes, que suponía el desarrollo de una tecnología de bajo costo y de mayor volumen de producto, SunPower desarrolló una gran capacidad de producción de cryocoolers a finales de 1990. Así mismo, SunPower diseñó el primer modelo, el M87, específicamente para la producción en un entorno de fabricación.

De éste modo, cientos de ellos fueron construidos para la prueba y la venta. Dos de ellos, fueron modificados, resultando como productos derivados del M87 y que estaban programados para su uso en el Espectrómetro Magnético Alfa AMS-02, para poder así ser empleados en experimentos acontecidos en el espacio.



Así pues, la colaboración de SunPower con la empresa conocida como CryoTel, en el desarrollo de tecnología destinada a aplicaciones criogénicas tiene como resultado la producción de una serie de dispositivos que no tienen parangón en términos de rendimiento y disminuido tamaño de los mismos con respecto a los pertenecientes a la competencia. No requieren mantenimiento, y su capacidad de enfriamiento se puede variar en un amplio rango de temperaturas, siendo de éste modo, aptos para un mayor número de aplicaciones.

Algunos de los principales productos desarrollados, así como algunas de las aplicaciones con más demanda en el mercado actual pueden ser el empleo de la tecnología de filtros superconductores en el campo de las telecomunicaciones, tecnología directamente aplicada en técnicas de criocirugía y empleo de elementos enfriadores en satélites enviados al espacio.

- **Compresores lineales:**

Los compresores lineales desarrollados por SunPower resultan ser elementos muy compactos, con un muy bajo número de piezas, reduciendo al máximo tanto su tamaño como su masa y simplificando al más alto nivel su funcionamiento, dando lugar a dispositivos altamente eficientes, libres de aceite, esto es, no precisan de lubricación y modulables en alto grado.

Por otro lado, sería necesario enumerar algunos de los productos y aplicaciones que actualmente se encuentran en fase de producción, como pueden ser unidades de generación de energía eléctrica mediante la captación del calor de la energía solar, empleo de recursos fósiles y biomasa para alimentar tanto generadores eléctricos como



aparatos destinados a cogeneración e incluso empleo de dispositivos Stirling como suministrador de potencia auxiliar en vehículos.

1.3.4.- Stirling Biopower, Inc.

- **INFORMACIÓN GENERAL:**

Stirling Biopower [23] se trata de una empresa con sede en Michigan, EE. UU, fundada en el año 1980 y que cuenta con más de 32 patentes en su historia, pertenecientes tanto al diseño de motores de ciclo Stirling como a tecnologías relacionadas con los mismos y en las cuales los incorpora.

- **MOTOR STIRLING:**

Diseña y produce motores Stirling para su posterior integración en sistemas de generación de energía eléctrica. La consecuencia de los continuos diseños, prototipos, pruebas y finalmente productos que ésta empresa ha ido llevando a cabo con el paso de los años ha sido el desarrollo de un generador de energía eléctrica y térmica conocido como PowerUnit,

PowerUnit representa un motor Stirling con una gran versatilidad, ya que puede emplearse casi cualquier combustible para su puesta en marcha, desde combustibles fósiles, tanto en estado gaseoso como líquido, hasta biomasa e incluso vapores a alta temperatura residuales de otros procesos productivos. Así mismo el hecho de ser necesaria para su funcionamiento una combustión constante, a diferencia de lo que ocurren en motores de ciclo Otto y diesel, supone prácticamente la combustión del 100



% de los hidrocarburos, dando lugar a un muy bajo porcentaje de NO_x y CO₂ en el proceso.

Se trata de un sistema ideado para ser fácilmente conectado a la red, sin necesidad de realizar obra en el emplazamiento del producto así como tampoco es necesaria la compra de transformadores, que pueden resultar, en otros casos, imprescindibles para poder conectar el producto a la red. Del mismo modo, debido a incorporar un motor de tipo Stirling, PowerUnit constituye un producto para el cual no es necesaria la instalación de ningún tipo de atenuación para ruido o vibraciones debido a la casi nula existencia de las mismas durante el funcionamiento de la máquina.

Igualmente, tal y como ya se ha comentado en anteriores ocasiones, debido tanto a que la combustión tiene lugar en el exterior de los cilindros del motor Stirling, evitando de éste modo la quema de aceites y deposición de residuos tanto de residuos en su interior, como a que éste presenta prácticamente el 50 % de las piezas de cualquier motor de combustión interna carece de mantenimiento alguno.

De éste modo se presenta un dispositivo capaz de generar 43 kWe de potencia a 60Hz y 38 kWe a 50 Hz, con una eficiencia media del 28 %, si es usado únicamente como generador de energía eléctrica y una eficiencia media del 80 % si se emplea para generar simultáneamente energía eléctrica y térmica, lo que se conoce como cogeneración, CHP (Combined Heat and Power).

- **APLICACIONES:**

Por último, y una vez desarrolladas debidamente las características técnicas de PowerUnit combine repasar algunas de las aplicaciones para las cuales es demandada ésta tecnología en la actualidad, como puede ser su empleo en tratamiento de aguas residuales, tanto municipales, como agrícolas e industriales, empleo de biomasa en la generación de energía eléctrica, y sobre todo para fines destinados a la CHP.

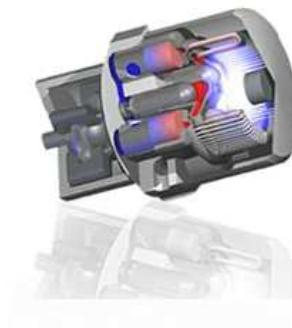


Figura 11. Motor de Stirling Biopower

1.3.5.- Stirling Technology, Inc.

- **INFORMACION GENERAL:**

Stirling Technology, Inc [24], con sede localizada en Ohio, EE. UU, es una organización internacional de ingeniería y marketing comprometida con el desarrollo de tecnologías ambientalmente sostenibles. Se trata de una empresa que diseña y produce motores Stirling tanto para su uso como dispositivo individual generador de energía eléctrica y térmica como para su posterior distribución a otras empresas, que lo integran en las diferentes tecnologías que desarrollan.

De éste modo, la compañía Stirling Technology, Inc. ha creado una empresa conjunta, el Shenyang UltimateAir Ventilador, CO.(UltimateAir ® RecoupAerator ®)



en China, en asociación con una gran compañía con sede también en China y otra procedente de Corea. La empresa conjunta ha sido creada para fabricar y vender una gama completa de productos basados en la tecnología de motor Stirling de alta eficiencia y recuperación de la energía desechada en la producción de energía eléctrica, dando lugar a dispositivos que una vez diseñados y desarrollados en Atenas, Ohio, serán destinados a los mercados Chino y Coreano.

El principal objetivo que rige la proyección comercial de Stirling Technology ésta basado en introducir nuevas tecnologías en el mercado, capaces de facilitar las condiciones de vida en poblaciones que habitan en zonas rurales o emplazamientos a los cuales resulta relativamente complicado hacer llegar el tendido eléctrico. La conciencia del posible aprovechamiento de combustibles renovables disponibles localmente, tales como agro – residuos y energía solar ha hecho posible el desarrollo de un motor Stirling con intercambiador de calor rotativo Core y RecoupAerator, producto que ha recibido el nombre de ST – 5.

- **MOTOR STIRLING:**

Así pues, el ST – 5, ha sido diseñado tanto con el fin de poder mejorar las condiciones de vida en poblaciones a las que resulta difícil hacer llegar la corriente eléctrica, como una alternativa a la dependencia actual que presenta la sociedad frente combustibles fósiles.

Se trata pues de un robusto motor diseñado para proporcionar un mínimo de 5 CV de potencia, 3.5 kWe, directamente desde una variedad de combustibles, tanto renovables como no renovables. Su ciclo de combustión externa de Stirling elimina



bujías, los sistemas de inyección de combustible, silenciadores, humos nocivos y, muy notablemente, el ruido de los motores de combustión interna. Esta falta de complejidad, junto con el uso de rodamientos sellados de alta calidad y la alta viabilidad de los sellos de teflón impregnados que fijan las uniones entre las diferentes partes, hace que quede eliminada la necesidad de cambios de aceite, siendo innecesario de éste modo cualquier tipo de mantenimiento.

De modo alguno, el detalle constructivo que hace destacar éste dispositivo, reside en el hecho de que prácticamente cualquier material combustible sea adecuado para el ST – 5. De entre la gran variedad de combustibles aceptados por éste motor se encuentran la madera, hojas, paja, cáscaras de maní, las malas hierbas, desperdicios de algodón, otros subproductos derivados de las actividades agrónomas y gas natural.

El ST – 5 consta de dos componentes principales, el motor, y el quemador. La función del quemador consiste en proporcionar calor a la cabeza del calentador, que se inserta en el quemador. Dos opciones de quemador están disponibles actualmente, el quemador de ciclón para los combustibles de partículas pequeñas, como la biomasa, serrín u otros, y un segundo quemador de madera de dos etapas.

Con el fin de obtener las altas temperaturas necesarias para ejecutar el motor, que oscilan en torno a los 510 °C, los dos quemadores tienen un ventilador de aire forzado. Una vez arrancado el motor, el ventilador es gestionado por el propia ST-5.

En éste dispositivo, el circuito de refrigeración funciona como cualquier sistema de refrigeración del automóvil. Una pequeña bomba, operada por el motor, hace circular



el líquido refrigerante, que puede ser o bien agua, o bien agua con glicol, a través de un radiador, mientras que un ventilador montado en el volante de aire sopla a través del radiador y vuelca el calor no utilizado en la atmósfera.

El calor desprendido por el sistema ST-5 durante la generación de electricidad puede ser recuperado y utilizado con gran efectividad en el calentamiento del agua doméstica, dado que a plena potencia, el motor produce más de 25 kWt de calor recuperable, valor situado muy por encima de las necesidades de una casa promedio, dando lugar, si al calentamiento del agua doméstica es destinado ese calor residual, a una media de 2000 litros/h de agua a 80 °C.

Este sistema consta de dos partes, una para generar y almacenar energía eléctrica, y la otra destinada a la recuperación y el almacenamiento de calor generado durante la primera.

El motor ha sido diseñado para proporcionar hasta 3,5 kWe de potencia eléctrica, generados a 650 rpm, para que la frecuencia eléctrica se mantenga en 60 Hz, suficiente para afrontar las necesidades eléctricas derivadas del empleo de lavadoras y otros electrodomésticos que de otro modo incrementarían notablemente el consumo eléctrico en el hogar. Una opción sería hacer funcionar el motor de 4 a 6 horas al día, periodo durante el cual suele ser frecuente el uso de aparatos como la lavadora, el lavavajillas, herramientas eléctricas, etc.... Otra opción podría ser el aprovechamiento de la electricidad generada mediante su almacenamiento en baterías que pueden ser cargadas para su posterior uso, aun cuando el motor no se encuentre en funcionamiento.

La finalidad principal para la cual ha sido desarrollado el ST - 5 es su empleo de modo estacionario para fines tanto agrícolas e industriales como residenciales en pequeña escala. Cualquier aplicación que requiera una larga vida motor y horas de funcionamiento.

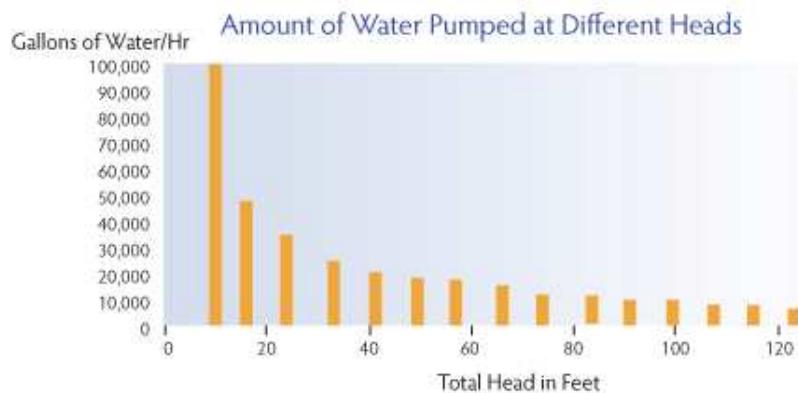


Figura 12. Motor ST - 5

- **APLICACIONES:**

Algunas de las aplicaciones con mayor de manda de éste tipo de tecnología resultan ser la generación de electricidad, el bombeo de agua y la alimentación de instrumentos de reducido tamaño, tales como compresores, etc....

En el caso de ser empleado como mecanismo para el bombeo de agua, el ST - 5 sólo requiere de una bomba centrífuga de agua adecuada. La cantidad de agua que se bombea dependerá de la eficiencia de la bomba y de la profundidad desde la cual se bombea el agua. A continuación tal característica queda reflejada en el gráfico que se presenta, en el cual se ha considerado una eficiencia media del 60 %.



Gráfica 2. Capacidad de bombeo.

Entre las aplicaciones para las que están siendo estudiados éste tipo de sistemas son tomas de petróleo de los pozos de menos de 1 Km de profundidad.

1.3.6.- WhisperGen

- INFORMACION GENERAL:**

WhisperGen [13], fue fundada en el año 1995 y actualmente tiene su domicilio local junto con infraestructuras destinadas a la investigación y desarrollo, así como con algunas otras derivadas a la fabricación, en Christchurch, Nueva Zelanda. Como principal accionista de la compañía destaca Meridian Energy [25], una de las compañías de Nueva Zelanda generadoras de energía eléctrica más grandes.

En Septiembre del año 2008, WhisperGen, formó una empresa conjunta con la Corporación Mondragón Cooperativa, que recibe el nombre de Efficient Home Energy, SL (EHE) [26], con sede en España, con una capacidad inicial de producción de 30.000 unidades anuales, y a la cual le han sido concedidos los derechos de fabricación y de



distribución para los países de la Unión Europea y que anteriormente pertenecían a WhisperGen.

EHE comenzó la producción de la tecnología en Agosto del año 2009, tras la obtención del certificado CE (Conformidad Europea) para el nuevo modelo de WhisperGen.

- **MOTOR STIRLING:**

La tecnología de base innovadora detrás del éxito del sistema generador de calor y electricidad de WhisperGen es un motor Stirling de cuatro cilindros y en cuyo se encuentra confinado el fluido de trabajo, en ésta caso, nitrógeno en estado gaseoso. Así pues, éste sistema comercializado inicialmente en el año 1998 es capaz de producir electricidad y agua caliente, gracias al mecanismo patentado y conocido como horquilla oscilante, que transfiere el movimiento vertical de los pistones al movimiento de rotación del alternador.

- **APLICACIONES:**

El principal compromiso que muestra WhisperGen y como más adelante se detallará está basado en mostrar al mundo una manera mejor y más eficiente de producir y utilizar la energía disponible; compromiso que se confirma con el sistema WhisperGen microCHP, que integra un motor Stirling diseñado por la propia compañía y presenta un silencioso comportamiento mediante un uso altamente eficiente de diversos combustibles, resultando un dispositivo con una eficiencia extremadamente alta, dando lugar a un aprovechamiento del 90 % de la energía, mediante la generación simultánea tanto de calor como electricidad.



De éste modo, mediante éste sistema, es posible producir simultáneamente 1 kW_e de potencia eléctrica y 12 kW_t de potencia calorífica, reduciendo las emisiones de CO₂, causantes del efecto invernadero, en más de 1.500 kg por año para una casa típica europea, en comparación con la generación de electricidad convencional, lo que resulta en una reducción del 20 % de las emisiones CO₂ anuales y por hogar.

A modo de ejemplo, resulta altamente interesante señalar que un sistema WhisperGen microCHP, es capaz de proporcionar un ahorro anual de 170 Euros por hogar.

Finalmente, resulta esencial señalar, que dentro de la tecnología de microCHP ya comentada, WhisperGen ofrece dos variantes diferentes de la misma con carácter altamente innovador, fundamentadas igualmente en la tecnología de motor Stirling, una desarrollada para trabajar conectados a la red general de distribución y otra para trabajar de modo autónomo como generador para la carga de baterías o aprovechamiento directo de la energía generada.

- **Productos para trabajar conectados a la red:**

El sistema de gas de WhisperGen microCHP es para el uso en el hogar doméstico, que actúa como un eficiente sistema de calefacción de caldera tradicional, que también es capaz de generar simultáneamente energía eléctrica, que funciona como complemento a la aportada por la red general de distribución eléctrica, para su complemento o bien puede ser exportada a la misma, con la consiguiente reducción de la factura, como ya se ha comentado con anterioridad.



- **Productos para trabajar sin conexión a la red:**

Así pues, WhisperGen se dedica también a la producción de dispositivos para trabajar aislados de la red, de gran utilidad en barcos, para la carga de baterías eléctricas, y en hogares a los que, por su situación, resulta muy difícil hacer llegar la corriente eléctrica de modo convencional, y que mediante éste dispositivo están capacitados para la generación tanto de electricidad como de agua caliente.



ANEXO II: Ampliación sistemas de

cogeneración

2.1.- Introducción

En éste apartado, se va a ampliar la información en lo referente a sistemas de cogeneración, mediante la descripción los componentes constituyentes de los mismos, el estudio sobre su aplicación a las centrales termosolares y por último, mediante un análisis de la evolución sufrida por los mismos en los últimos años en España.

2.2.- Elementos constitutivos de una planta con sistema de cogeneración

A continuación, se va a realizar una breve descripción de algunos de los elementos que pueden encontrarse en una planta de generación de energía eléctrica que incorpore un sistema de cogeneración:

- **Fuente de energía primaria:** Suele ser gas natural, gasóleo o fuelóleo. En el caso de tratarse de una central termosolar, la energía primaria sería la radiación procedente del Sol.



- **El elemento motor:** Es el elemento encargado de convertir energía térmica o química en mecánica. Dependiendo del tipo de planta, puede tratarse de turbinas de gas, turbinas de vapor o motores alternativos. Las turbinas de vapor resultan ser los generadores de modo prácticamente exclusivo de las centrales termosolares.
- **El sistema de aprovechamiento de energía mecánica:** En general suele estar formado por un alternador que la transforma en eléctrica, muy versátil y fácil de aprovechar, pero también puede tratarse de compresores, bombas, etc..., donde la energía mecánica se aprovecha directamente.
- **El sistema de aprovechamiento de calor:** Puede tratarse de calderas recuperadoras de calor de gases de escape, secaderos o intercambiadores de calor, o incluso unidades de absorción que producen frío a partir de este calor de bajo rango.
- **Sistemas de refrigeración:** Al final, siempre una parte de la energía térmica contenida en el combustible no será aprovechada en la planta y debe ser evacuada. Las torres de refrigeración. Los aerocondensadores o los intercambiadores suelen ser elementos habituales de estos sistemas. Un objetivo muy importante del diseño de una planta de cogeneración es minimizar esta cantidad de calor desaprovechada y evacuada a la atmósfera.



- **Sistema de tratamiento de agua:** Tanto el sistema de refrigeración como el de aprovechamiento de calor requieren unas especificaciones en las características físico-químicas del fluido que utilizan (generalmente agua) que requiere de una serie de sistemas para su tratamiento y control.
- **Sistema de control:** Que se encarga del gobierno de las instalaciones, normalmente muy automatizadas.
- **Sistema eléctrico:** Que permite tanto la alimentación de los equipos auxiliares de la planta, como la exportación/importación de energía eléctrica necesaria para cumplir el balance. La fiabilidad de esta instalación es muy importante, así como la posibilidad de trabajo en isla, lo que permite alimentar la fábrica en situación de deficiencia de la red externa y estar disponible inmediatamente en el momento que se restablezcan las condiciones del servicio.

2.3.- Tecnología en centrales termosolares

En éste apartado, se va a hacer referencia exclusivamente a las centrales termosolares, como las centrales de torre y las de colectores cilíndrico parabólicos, esto es, tal y como ya se ha comentado en numerosas ocasiones anteriormente, centrales que emplean la radiación solar como materia prima y turbinas de vapor y alternador como generador eléctrico.



Así pues, en las centrales termosolares, tanto en las centrales de torre central como en las de colectores cilíndrico parabólicos la generación de energía eléctrica se lleva a cabo mediante la concentración de la radiación solar. En éstos procesos, no todo el calor presente en el vapor de agua una vez que entra en la turbina es empleado en producir el movimiento necesario en ésta última, de modo, que una parte de ese calor, ha de ser expulsado al exterior, disminuyendo así el rendimiento global de la instalación y desperdiциando una cierta cantidad de energía.

La implementación de los sistemas de cogeneración en éste tipo de centrales permiten precisamente el aprovechamiento de ese calor residual que ha de ser expulsado al exterior, destinándolo para aumentar la temperatura del fluido de trabajo de nuevo, con lo que a partir de la misma cantidad de radiación absorbida, se aprovecha mayor cantidad de energía térmica lo que se traduce instantáneamente en un mayor rendimiento de la instalación y un aprovechamiento más eficiente de la energía.

2.4.- Evolución de la situación de los sistemas de cogeneración en España

La cogeneración, tal y como anteriormente se ha desarrollado, es la producción simultánea de dos o más energías diferentes, generalmente, energía eléctrica y energía térmica. De éste modo, los sistemas de cogeneración pueden ser implementados en centrales eléctricas que empleen tanto gas natural como cualquier otro combustible fósil, así también como en centrales de producción de energía eléctrica que empleen energías renovables en sus procesos productivos. Así pues, los datos que siguen se



refieren a los sistemas de cogeneración en general, sin hacer referencia a la materia prima empleada en cada caso en particular.

En España a finales del 2002 se cuenta con unos 5600 MWe de potencia instalada de cogeneración y se espera que en los próximos años la cogeneración siga incrementando su participación en la generación eléctrica para el año 2011, según el Documento Planificación de los Sectores de Electricidad y Gas.

De éste modo, Desarrollo de las Redes de Transporte 2002-2011 estima en 7.100 MW instalados en el año 2011 con una producción de 38.000 GWh incluyendo el autoconsumo. De ese modo, el 30% de las industrias dispondrán de sistemas de cogeneración que les proporcionarán el 11% de la electricidad y calor que precisen, lo que se traducirá en un claro aumento de competitividad de las mismas. Estas razones, colocan a la cogeneración en un lugar destacado dentro de la Estrategia de Eficiencia Energética de la UE y su Plan de Acción, naturalmente apoyados por la Directiva de Cogeneración y empresas de servicios energéticos.

Por otro lado, la Comisión Europea presentó el 29 de julio del 2002 una propuesta de directiva sobre el fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía. En Febrero del año 2004 se publica finalmente el texto en el Diario Oficial de la Unión Europea como "Directiva 2004/8/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de Febrero de 2004".

La directiva tiene como objetivo la creación de un marco para el fomento y desarrollo de la cogeneración de alta eficiencia de calor y electricidad basado en la



demandas de calor útil y en el ahorro de la energía primaria. Como puntos más importantes se destacan: la garantía de origen de la electricidad, los métodos de cálculo para la electricidad cogenerada y la metodología para determinar la eficiencia.

Por otro lado, el monto del recibo de electricidad que se destinará a compensar las instalaciones de régimen especial (energías renovables y cogeneración) disminuirá este año hasta los 6.172.000.000 Euros. Esto representa un retroceso del 12% en contraposición de los 7.066.000.000 Euros del año pasado. La información ha sido publicada en el informe de la Comisión Nacional de Energía, CNE.

Así pues, durante 2011 las primas entre las energías verdes serán distribuidas de la siguiente manera:

- Fotovoltaica 2.093.000.000 Euros.
- Eólica 1.490.000.000 Euros.
- Cogeneración 1.321.000.000 Euros.
- Termosolar 403.000.000 Euros.
- Biomasa 259.000.000 Euros.

El ente regulador afirma que dichas previsiones fueron calculadas tomando en cuenta el real decreto ley 14/2010 de medidas contra el déficit tarifario, con el cual se pretende disminuir el coste de la red eléctrica en 4.600.000.000 Euros en los próximos tres años. El decreto regula las horas con derecho a prima de la energía fotovoltaica que según los números de Min-Industria, deberá ahorrar 740.000.000 Euros en 2011 y

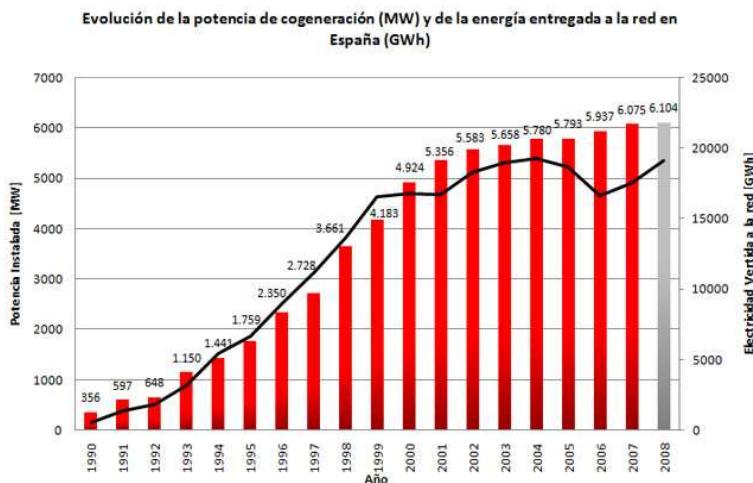


2.200.000.000 Euros durante los próximos dos años. Las enmiendas presentadas por CiU ante el Senado para matizar el recorte fueron vetadas por el Gobierno.

Min-Industria proyecta evitar unos gastos en la red de electricidad por uno un mil 660.000.000 Euros durante 2011, de los cuales 51.000.000 Euros serán ahorrados por la energía eólica y 451.000.000 Euros por la energía termosolar, sin dejar de mencionar la regulación de la fotovoltaica.

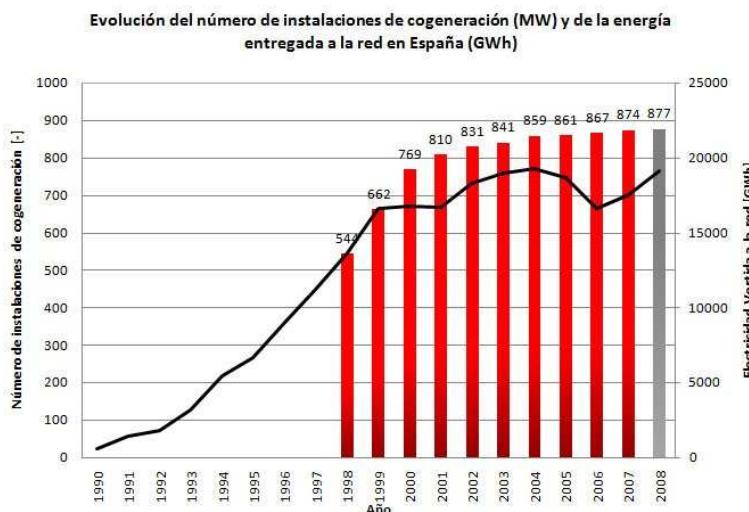
Finalmente, resulta imprescindible comentar, cinco medidas políticas clave que se cree deben ser tomadas para impulsar el desarrollo de la cogeneración, repercutiendo en mayores beneficios económicos y medioambientales para los Estados miembros y los sectores clave de la Industria, a saber, el desarrollo del potencial de cogeneración y de district heating and cooling; la renovación y actualización de las plantas existentes; el desarrollo de la cogeneración con biomasa, biogás y combustibles residuales; la captura y almacenamiento de CO₂ y la investigación y desarrollo.

Con el objetivo de apreciar gráficamente la evolución de la potencia instalada en España mediante sistemas de cogeneración se ha creído conveniente mostrar aquí el gráfico que sigue [105].



Gráfica 3. Evolución de la potencia instalada mediante cogeneración (MWe) en España

Del mismo modo, se ha estimado conveniente la representación de un gráfico que muestre la evolución del número de empresas que han implementado en sus instalaciones sistemas de cogeneración en España [105].



Gráfica 4. Evolución del número de instalaciones de cogeneración (MW) en España.

Por último, va a presentarse aquí un gráfico con la evolución del porcentaje de energía generada mediante cogeneración con respecto al total en España [105].



Gráfica 5. Evolución del porcentaje de energía generada mediante cogeneración en España.



ANEXO III: Ampliación sistemas de

almacenamiento térmico

3.1.- Introducción

En éste apartado, y con objeto de ampliar la información desarrollada en el apartado correspondiente a los sistemas de almacenamiento térmico, se ha creído conveniente, en un primer lugar, proceder a la enumeración y análisis de los diferentes criterios de clasificación a los que atienden éste tipo de sistemas de almacenamiento aplicados a cualquier dispositivo de generación de energía eléctrica a partir de la absorción de la radiación solar en general.

A continuación, se estudiarán los sistemas de almacenamiento térmico mediante sales fundidas, aplicados a las centrales termosolares, esto es, a las centrales de torre y a las de colectores cilíndrico parabólicos. Del mismo modo, se estudiará el estado actual de desarrollo que presentan estos sistemas mediante la experiencia acumulada de los que ya se encuentran en funcionamiento en diferentes centrales termosolares.

Por último se va a realizar una breve descripción de las nuevas tecnologías de almacenamiento térmico que se encuentran en fase de estudio y desarrollo en la actualidad.



3.2.- Criterios de clasificación

Así pues, dentro de su función global, enunciada en líneas anteriores, un sistema de almacenamiento térmico puede diseñarse para alcanzar diferentes objetivos específicos, no necesariamente incompatibles entre sí y entre los cuales pueden destacarse:

- **Dotar de estabilidad al funcionamiento de la planta durante períodos de fuerte variabilidad de la radiación solar:** Este objetivo puede conseguirse con sistemas de almacenamiento de capacidad relativamente pequeña, que deben tener una respuesta rápida.
- **Dotar de “programabilidad” a la planta:** Permitir el desplazamiento temporal y la regulación de la generación eléctrica de acuerdo a criterios de diferente naturaleza (tarifarios, energéticos...). La programabilidad de una planta o una central termosolar requiere almacenamientos de capacidad media – alta.
- **Aumento del factor de capacidad de la planta:** El aumento del factor de capacidad tiene un efecto positivo sobre la vida de algunos equipos, al reducirse el número de arranques y paradas, así también como sobre la amortización del bloque de potencia.



Por otro lado, atendiendo a la finalidad para los cuales serán empleados, los sistemas de almacenamiento térmico pueden clasificarse según el siguiente criterio:

- **Almacenamiento a largo plazo:** Para compensar las variaciones estacionales. Conceptualmente están basados en el empleo de energía química como forma de almacenamiento, y están muy escasamente desarrollados.
- **Almacenamiento a medio plazo:** Para compensar las variaciones en períodos temporales de uno a varios días. Pueden basarse en almacenamiento en forma de calor latente o sensible, típicamente tienen capacidades del orden de varias horas de funcionamiento de la planta a potencia nominal y presentan un nivel de desarrollo aceptable, aunque aún no han sido totalmente demostrados para todas las tecnologías de que constan las centrales termosolares. Por ejemplo, estos sistemas no están todavía totalmente desarrollados en un entorno comercial para las centrales termosolares con canales parabólicos.
- **Almacenamiento a corto plazo:** Para compensar transitorios y períodos de nubosidad intermitente. Suelen ser de pequeña capacidad, presentando valores máximos de hasta 2 horas y pueden considerarse demostrados a escala real.

Se hace necesario, a la vista de lo anteriormente desarrollado, explicar la diferencia entre calor sensible y calor latente, siendo el calor sensible la variación de energía interna de un sistema como consecuencia de una variación de temperatura pero sin que tenga lugar el cambio de fase, mientras que el calor latente se define como la



variación de energía interna pero consecuencia de un cambio de fase. En general, el almacenamiento por calor sensible requiere mucho más volumen que por calor latente.

Del mismo modo, resulta interesante resaltar algunos de los factores clave a tener en cuenta a la hora de seleccionar y analizar los diferentes dispositivos que pueden encontrarse en la actualidad en materia de almacenamiento térmico, a saber:

- **Cantidad de energía almacenable por unidad de volumen, kWh/m³.**

- **La transmitancia en el proceso:** Es la cantidad de calor almacenado perdida a través de la superficie del tanque de almacenamiento.

- **La toxicidad de la sustancia de trabajo.**

- **Coste de la sustancia de trabajo.**

Por otro lado, desde el punto de vista del dimensionado y el diseño de un sistema de almacenamiento, deben tenerse en cuenta tanto los factores que afectan a la capacidad del almacenamiento como los que inciden sobre el coste del mismo. La capacidad de almacenamiento suele medirse en horas de funcionamiento de la planta a potencia nominal, no en términos de energía térmica almacenada, ya que de esta forma se estaría ignorando la dependencia de los niveles de temperatura en el almacenamiento.
Así pues los principales factores técnicos a tener en cuenta son:



- Alta densidad energética de la sustancia o material de almacenamiento.
- Buena transferencia de calor entre el fluido de trabajo del campo solar.
- Estabilidad mecánica y química de la sustancia de almacenamiento.
- Compatibilidad química entre fluido de transferencia de calor, la sustancia de almacenamiento y el material de los intercambiadores, caso de existir.
- Reversibilidad en los ciclos de carga y descarga.
- Bajas pérdidas térmicas del sistema.
- Control del sistema de carga, almacenamiento y descarga.

Por último se va a realizar una breve distinción teniendo en cuenta el medio de almacenamiento, de modo que pueden encontrarse sistemas de almacenamiento en medio simple y en medio dual:

- **Sistema almacenamiento en medio único:** En éste caso, el fluido caloportador (HTF), resulta ser también el medio de almacenamiento. Algunos ejemplos son las sales fundidas o aceites. Presentan una eficacia media del 90 %.



- **Sistema almacenamiento en medio dual:** En ésta otra situación, el fluido HTF y el medio de almacenamiento resultan ser distintos, incurriendo de éste modo en unos costes inferiores. Presentan una eficacia del 70 %.

3.3.- Tecnología de sales fundidas en centrales termosolares

La tecnología de sales fundidas es empleada como un método de almacenamiento de energía térmica, en las centrales termosolares, como las centrales de torre y las de colectores cilíndrico parabólicos, para generar electricidad cuando no se dispone de radiación solar, tal y como ya se ha comentado anteriormente.

Las sales fundidas están constituidas de forma general por un 60 % de nitrato de sodio y en un 40 % de nitrato de potasio, resultando una sustancia no inflamable ni tóxica, y que ya ha sido empleada en las industrias química y metalúrgica como fluido de transporte térmico.

Dentro de la tecnología de almacenamiento térmico fundamentada en sales fundidas, pueden distinguirse dos variantes diferentes, a saber, almacenamiento térmico en medio único y almacenamiento térmico en medio dual tal y como ya se ha comentado. La primera de ellas, y objeto de nuestro estudio, a su vez puede dividirse en almacenamiento térmico en dos tanques, que, por otro lado, resulta ser la técnica más extendida y empleada en la actualidad, y almacenamiento térmico mediante sales fundidas en un solo tanque.



- **Almacenamiento térmico en dos tanques:**

En este tipo de sistemas las sales fundidas son almacenadas en dos tanques; uno caliente, y otro frío. Las sales son calentadas por un intercambiador de calor en su camino hacia el tanque caliente de almacenamiento. En el momento en el que se necesita recuperar la energía térmica, las sales pasan otra vez por el intercambiador de calor transfiriendo calor a un aceite que alcanza temperaturas en torno a los 300 °C.

Así pues, la sal se funde a 221 °C, se mantiene líquida a 288 °C en un tanque de aislamiento, en frío, de almacenamiento. Una vez se encuentra en estado líquido, la sal es bombeada a través de los dispositivos concentradores solares donde el sol la calienta hasta alcanzar los 566 °C. Posteriormente, es enviada a un tanque de almacenamiento de calor, donde puede mantenerse confinada.

Cuando el empleo de tal energía térmica es requerido para la generación de electricidad en la planta, la sal caliente se bombea a un generador de vapor convencional para producir vapor sobrecalegado que será el encargado de provocar el movimiento de la turbina, que junto con el alternador, serán los encargados de proporcionar la energía eléctrica requerida. A modo de ejemplo, resulta interesante comentar que para una turbina capaz de generar 100 MWe de potencia eléctrica, se necesitan tanques de aproximadamente 9,1 m de altura y 24 m de diámetro para almacenar energía térmica durante cuatro horas.



En una versión similar, conocida como sistema directo de dos tanques, las sales fundidas son utilizadas tanto para el almacenamiento como para la transferencia de calor. Esto implica almacenamiento directo y hace que se puedan alcanzar temperaturas más altas y eliminar los costes debidos a los intercambiadores de calor.

Este tipo de sistemas de almacenamiento térmico, suponen numerosas ventajas con respecto a otros sistemas. La principal es que pueden conservar el calor producido durante el día, y producir electricidad durante más de ocho horas a plena capacidad después de que el sol se haya puesto, o en días lluviosos o nublados, convirtiendo de éste modo a la tecnología empleada en las centrales termosolares relativamente independiente de las condiciones atmosféricas. Estas cifras se logran gracias a su capacidad de mantener el calor durante horas de manera muy eficiente.

A modo de ejemplo, puede tomarse un valor de la eficiencia media que se obtiene del empleo de éstos sistemas del 93 % a una temperatura de trabajo de unos 224 °C [106]. Esto es, el porcentaje de la energía térmica inicialmente absorbida que puede ser aprovechada después de su almacenamiento.

Así pues, la tecnología de sales fundidas ha sido probada y es bien conocida. No obstante, presenta problemas técnicos, como el alto punto de congelación de las sales y sus elevados costes de inversión. Las sales fundidas incluyen sales de nitrato, un producto sujeto a cierta volatilidad de precios en el mercado.



Algunos estudios sugieren que el coste de almacenamiento por sales fundidas alcanzaría un precio en torno a los 20 – 30 Euros/kWh [106], dependiendo del tamaño de almacenamiento del sistema. Sin embargo, según Tom Mancini, Director de Programa CSP para Sandia National Laboratories [85], las cifras de precios actuales para sales fundidas podrían ser una representación no del todo fiable.

- **Almacenamiento térmico en un solo tanque o sistema thermocline:**

Otra opción es la constituida por un sistema de almacenamiento de un sólo tanque thermocline, un tanque con una zona caliente en su parte superior, una zona de transición en la parte intermedia y una zona fría en la parte inferior.

Los sistemas de un sólo tanque con sales fundidas pueden reducir considerablemente el coste de almacenamiento reemplazando parte de las sales por materiales más baratos como cuarcita y arena. SunLab [109] estima el coste de un sistema thermocline con cuarcita en torno a 14 Euros/kWh [106].

Por otro lado, uno de los muchos problemas aún por resolver está en cómo eliminar calor del sistema sin destruirlo, provocando que la zona thermocline se expanda y ocupe todo el tanque.

Sandia National Laboratories (SNL) [85] desarrolló un sistema de almacenamiento thermocline de 2,5 MWh [106] con sales fundidas, cuarcita y arena hace 10 años. El organismo americano National Renewable Energy



Laboratory (NREL) [110] y SNL están, en estos momentos, analizando costes y realizando estudios de rendimiento para sistemas thermocline.

Otros sistemas de almacenamiento de energía, como el aire comprimido o los procedimientos mecánicos, tienen una eficiencia mucho menor. En cuanto a las baterías, por el momento su grado de desarrollo y su precio no las hace muy competitivas.

Los proyectos de investigación a largo plazo buscan otras tecnologías de almacenamiento térmico, como el calor en la arena o la creación de un solo tanque para la sal fundida.

3.4.- Estado actual de desarrollo y experiencia práctica en centrales termosolares

Teniendo en cuenta lo expuesto en el apartado anterior, las opciones para el sistema de almacenamiento en centrales termosolares están muy limitadas por el hecho de que en la actualidad, no hay más opción que el empleo de siliconas o aceites térmicos como fluido de trabajo.

Del mismo modo, y debido al hecho de ser, entre todas las tecnologías, la que actualmente presenta un nivel de desarrollo y evolución, la mayoría de las instalaciones de éste tipo se encuentran en centrales de colectores cilindro parabólicos, centrales por otro lado, destinadas a su explotación de cara a la venta de electricidad a la red general



de distribución, así como algunos casos aislados en pruebas y en fase de desarrollo, como la PS10, central termosolar de torre central que también incorpora un sistema de almacenamiento térmico.

En septiembre del año 2000, el National Renewable Energy Laboratory (NREL) [110] de los Estados Unidos publicó un estudio realizado por Pilkington Internacional en el que se analizaban las distintas opciones existentes para el sistema de almacenamiento en plantas de colectores cilíndrico parabólicos. Las conclusiones del mismo pueden considerarse válidas, ya que en los últimos años no se han producido avances que hayan permitido a ninguna tecnología incorporarse al grupo de las suficientemente probadas.

La experiencia sobre sistemas de almacenamiento térmico en centrales termosolares mediante el sistema de dos tanques de aceite mineral está fundamentada en la experiencia acumulada por las primeras plantas SEGS de California [60], como plantas de demostración, de las cuales las más significativas, tanto por capacidad como por tecnología, son las dos de la central de torre de Barstow, también situadas en California: el tanque de medio dual (aceite/rocas) de Solar One [48] y el sistema de dos tanques de sales fundidas de Solar Two [48]. Similar fue el sistema de dos tanques de sodio del proyecto IEA SSPS [48].

En cuanto a dimensiones se refiere el estado actual de desarrollo se centra en grandes volúmenes, 600 m³ en el caso de la central PS10 [51] que emplea agua a presión como medio de almacenamiento, capaz de generar la energía equivalente a la que produciría la central durante 50 minutos a media carga.

Por otro lado, en el caso de Andasol I - III [64], se emplea el sistema indirecto de dos tanques mediante un volumen de 30.000 m³, de modo que almacena energía capaz de mantener la planta en funcionamiento durante 7,5 horas a plena carga, lo que supone más de 1 GWh térmico de capacidad. Para conseguir esta capacidad de almacenamiento, el campo de concentradores solares a tenido que ser sobredimensionado, esto es, el área de captación es prácticamente el doble de la necesaria, para así poder generar energía térmica en exceso que almacenar en los tanques. Así pues, el sistema de almacenamiento incluye dos tanques con sales, mezclas de nitratos sódico y potásico, fundidas por encima de su punto eutéctico, a 225 °C. En el tanque caliente, las sales se encuentran a 384 °C, mientras que en el tanque frío lo hacen a 291 °C.

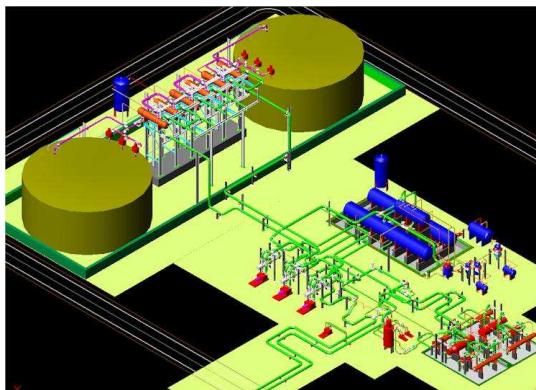


Figura 13. Sistema almacenamiento térmico de Andasol

Este sistema también planea ser adoptado por Abengoa Solar [50] en su planta de 280 MW Solana en Arizona [50] [106].

Torresol [58], sin embargo, está implantando un sistema directo de dos tanques para su planta de torre central Gemasolar [58] de 50MW. El sistema, diseñado por

SENER [56], es capaz de alcanzar temperaturas por encima de 500 °C [106]. 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. De éste 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.



Figura 14. Sistema almacenamiento térmico Gemasolar

Igualmente, SolarReserve [107] también planea usar un sistema directo de sales fundidas de dos tanques, fabricado por United Technologies [108], en sus plantas solares de torre.

Por otro lado, un aspecto importante a considerar es que el fluido de almacenamiento sea el mismo, o no, que el fluido de trabajo en los elementos absorbedores. El ejemplo más llamativo en el pasado fue el ya referido del sodio líquido en el subproyecto CRS del proyecto SSPS [48], de la Agencia Internacional de la



Energía en la Plataforma Solar de Almería, que fue objeto del accidente en el cambio de la bomba principal del sistema que originó un espectacular incendio.

En un futuro inmediato, los dispositivos cilindro parabólicos con agua en cambio de fase, es decir, generación directa de vapor, presentan una buena expectativa aunque tienen un inconveniente relativamente importante, la presión de equilibrio es alta, con lo cual el depósito de almacenamiento puede llegar a ser bastante costoso.

El hecho de que el fluido de trabajo en las centrales termosolares de canales parabólicos sea un aceite sintético o un aceite de silicona condiciona fuertemente la elección del medio de almacenamiento. Por otra parte, el empleo de aceites sintéticos o de silicona como medio de almacenamiento parece descartable debido a la peligrosidad del aceite sintético y al elevado coste, derivado tanto del material de almacenamiento como de los tanques a presión requeridos como consecuencia de la elevada presión de vapor de los aceites sintéticos. Por tanto, las opciones se reducen prácticamente al empleo de sistemas de calor sensible en dos tanques, indirectos, empleando sales fundidas como medio de almacenamiento o a sistemas en medio dual. Entre estos últimos, los más desarrollados son los que emplean hormigón, pero aún no pueden considerarse suficientemente maduros para su uso en plantas comerciales.

El sistema de almacenamiento indirecto en dos tanques de sales fundidas se ha demostrado a escala real en algunas plantas, tal y como ya se ha referido. Sin embargo, las condiciones de operación de una planta colectores cilíndrico parabólicos no son las mismas, ya que el salto de temperatura en estas últimas es inferior, y también lo es la temperatura del tanque caliente. Algunos estudios muestran que desde el punto de vista



de la ingeniería hay que tener en cuenta estas diferencias a la hora de diseñar el sistema de almacenamiento y los intercambiadores. Por otra parte, el menor nivel de temperatura requerido puede hacer viable el empleo de mezclas eutécticas de nitratos de sodio y potasio, de menor coste que las propuestas para la utilización a mayores temperaturas, como las denominadas HITEC o HITEC XL. A más largo plazo, el almacenamiento químico puede ser atractivo por lo que conviene dedicarle esfuerzos de I+D.

Como resumen, la experiencia sobre sistemas de almacenamiento para plantas solares es, aunque limitada, suficiente para afirmar que existen tecnologías viables desde el punto de vista técnico.

3.5.- Nuevas sistemas de almacenamiento térmico

[106]

Por último, y tal y como se adelantaba en la introducción, se van a analizar brevemente algunas de las tecnologías de sistemas de almacenamiento térmico que se encuentran en fase de estudio y desarrollo en la actualidad, entre las que pueden destacarse las que emplean hormigón como material de trabajo y las denominadas de guijarros y aire.

- **Hormigón:**

Una alternativa al empleo de sales fundías como medio de almacenamiento térmico sería el uso de materiales sólidos. La compañía de ingeniería civil alemana, Ed. Züblin [112] y el Centro Aeroespacial Alemán



(DLR) han desarrollado un sistema para plantas con colectores cilíndrico parabólicos que utiliza hormigón como medio de almacenamiento térmico.

En este sistema, el medio de transferencia calentado, que puede ser aceite, agua o vapor, pasa a través de tuberías incrustadas en el hormigón para calentarla. Con el fin de desprender energía térmica el fluido transmisor fluye frío a través del hormigón, en la dirección opuesta, al mismo tiempo que se calienta. Este sistema alcanza temperaturas de hasta 400 °C.

Züblin y DLR han probado de forma satisfactoria un módulo de hormigón de 20 m³ en Stuttgart, Alemania, usando aceite térmico como medio de transferencia.

La ventaja principal consiste en que el hormigón es mucho más barato que las sales. No obstante, el material necesario, incluyendo los tubos, añade costes al sistema. Lo cual implica que para una planta del tamaño de Andasol, este tipo de tecnología es sólo un poco más barata, según afirma ingeniero de Züblin, Carsten Bahl.

Sin embargo, los costes si se rebajan considerablemente en plantas más pequeñas de alrededor de 10 MWe, dado que esta tecnología puede utilizarse en varios tamaños, al contrario que los sistemas de dos tanques.

Un problema potencial de esta tecnología consiste en la forma de añadir y eliminar calor de forma rápida. Estos sistemas pueden funcionar correctamente



desde el punto de vista técnico pero hacer que sean eficientes desde el punto de vista económico resulta ser más complicado

Bahl, por otra parte, sigue confiando en que con algo más de trabajo, el diseño de estos sistemas pueda optimizarse para la reducción de costes [106].

- **Guijarros y aire:**

La compañía británica HelioDynamics [113] está buscando socios para el desarrollo de dos nuevos sistemas de almacenamiento térmico, uno de ellos proporcionando más efectividad, desde el punto de vista económico, que las sales fundidas y el otro otorgando más eficiencia.

El primer sistema utiliza una gran masa de arena en la que se intercalan tubos finos y baratos que transfieren calor a la arena para su almacenamiento. Manteniendo el aceite dentro de los tubos de acero se consigue la estabilidad del aceite a largo plazo.

Graham Ford, CEO de HelioDynamics, afirma que en éste sistema se necesita una gran cantidad de arena, aproximadamente el doble de la cantidad de sales fundidas que serían requeridas en su lugar, pero sigue siendo considerablemente más barato, ecológico y seguro, ya que los escapes sólo pueden ser pequeños.



De éste modo, HelioDynamics afirma que con la implementación de éste tipo de sistemas se pueden alcanzar unos costes inferiores a 10 Euros/kWh [106].

Por otro lado, el segundo tipo de tecnología consiste en un sistema thermocline usando guijarros de basalto y gas argón como medio transmisor. Mediante este sistema se pueden almacenar temperaturas de alrededor de 550-600 °C, las cuales están por encima de las alcanzadas en los sistemas cilindro parabólicos pero podrían ser útiles en plantas solares de torre.

En el año 2008, el programa del departamento de energía americano SETP (Solar Energy Technologies Program), anunció la concesión de financiación para la investigación y demostración de una serie de tecnologías incluyendo: materiales de cambio de fase, sales fundidas y hormigón. El objetivo de este programa consiste en reducir el coste de energía termoeléctrica a menos de 10 Euros/kWh [106].

Técnicamente es posible pero conseguir que estos sistemas funcionen a gran escala en plantas de demostración o comerciales no será fácil. La industria está dirigida por una comunidad financiera conservadora, por lo que es difícil que estos proyectos vean la luz, a menos que sean apoyados por una institución gubernamental que cuente con fondos importantes y esté dispuesto a invertir una cantidad considerable de tiempo en el proyecto.

Hasta que esto no ocurra y hasta que el mercado no opte por el desarrollo de nuevas formas de almacenamiento más baratas, las sales fundidas dominarán el sector.



ANEXO IV: Ampliación sistemas de

hibridación

4.1.- Introducción

En éste Anexo, y con el objetivo de ampliar la información desarrollada en el apartado correspondiente a la hibridación, se va a realizar un breve análisis de los criterios de clasificación de los diferentes dispositivos empleados en tecnologías de hibridación.

Además, y con el objetivo de conocer cuál es el estado de desarrollo de los diferentes sistemas de hibridación en la actualidad, se va a realizar un estudio de la tecnología de hibridación Sol – Gas y de las principales centrales termosolares que la incorporan, tanto en España como en el resto del mundo; del mismo modo, se llevará a cabo el estudio de la tecnología de hibridación Sol – Biomasa y de las centrales que la incorporan en España, ya con respecto a las centrales hibridadas Sol – Biomasa en el resto del mundo la información es muy escasa.



4.2.- Criterios de clasificación de los diferentes dispositivos

Así pues, tal y como ya se ha comentado en la introducción, la hibridación resulta ser el uso de diferentes fuentes de energía en una misma instalación, de modo que puedan ser empleadas unas u otras a conveniencia, según los requerimientos de la misma y las necesidades de demanda existentes.

Del empleo de éste tipo de sistemas se desprenden numerosas ventajas, algunas de las cuales van a ser mencionadas a continuación con el fin de dejar constancia de la necesidad que presentan estos sistemas de ser hibridados para resultar realmente competitivos en el mercado frente a otras tecnologías como la fotovoltaica. Algunas de las ventajas que presentan son:

- **Una elevada flexibilidad de los sistemas:** La adaptación de la producción a la demanda de electricidad.
- **Estabilidad de la producción:** Estabilidad en transitorios mediante el uso alternativo de los combustibles disponibles.
- **Mejora en la gestión**
- **Disminución del tiempo de amortización de los equipos:** Aumentan los tiempos de empleo de los equipos con lo cual disminuye el tiempo de amortización de los mismos.



La primera solicitud de hibridación de un sistema consta de los años 80, cuando el DOE, Departamento de Energía de los Estados Unidos, promovió un programa de hibridación de las plantas de combustibles fósiles con los sistemas de receptor central. Hoy en día el desarrollo de la planta termosolar ha invertido en la hibridación de las mismas, y en la actualidad, es el sistema de combustión quien apoya la planta solar.

Algunas de las plantas más importantes termosolares, entre las que se encontraban plantas de receptor central y plantas de colectores cilindroparabólicos, comenzaron a planificar su hibridación con gas natural, como Andasol [64], o biomasa. Varias plantas comenzaron su funcionamiento a partir de entonces así como diversos proyectos de plantas de receptor central, entre los cuales se pueden destacar Solgate [114], SolHyCo [115], que se desarrollarán más adelante por considerarse proyectos de importancia y Solugar y SIREC.

Por otro lado, la hibridación de sistemas resulta especialmente interesante cuando se trata de hibridar con dos o más energías renovables, tanto para disminuir de manera considerable esa dependencia que presenta la sociedad actual de los combustibles fósiles como para evitar la emisión de productos contaminantes a la atmósfera. De éste modo, se ha evaluado el impacto ambiental generado por la hibridación de diferentes fuentes de energía, a saber, entre otras, la energía eólica con la biomasa y la energía eólica con la energía fotovoltaica.

Sin embargo, la hibridación de la energía termosolar con biomasa resulta especialmente aventajada en este aspecto, ya que resulta ser la combinación que presenta los valores más bajos con respecto al baremo indicado.



El diseño del receptor híbrido, que será el encargado de absorber la radiación solar o la energía térmica procedente de la fuente alternativa es el punto clave de la evolución, ya que por otro lado, resulta ser un aspecto relativamente complejo técnicamente.

4.3.- Hibridación Sol - Gas

Una central termosolar hibridada con energía solar – gas natural resulta ser una planta que produce energía eléctrica mediante la concentración y aprovechamiento de la radiación solar, mediante el empleo de los distintos tipos de tecnologías ya comentadas, a saber, colectores cilíndrico-parabólicos y centrales de receptor central o centrales de torre.

No obstante, el aprovechamiento de la energía solar tiene algunas desventajas tal y como se ha comentado algunas líneas más arriba, entre las cuales destaca la intermitencia de la radiación solar, dependiente ésta de factores atmosféricos como pueden ser lluvias o nubes, que impiden que sobre la superficie de la tierra se pueda absorber esa radiación solar de manera directa.

Es en éste punto pues, donde cobra vital importancia la hibridación de las centrales con energía solar – gas natural en las cuales el gas natural es empleado en periodos transitorios en los cuales no puede ser aprovechada la radiación solar o cuando es necesario un aporte extra para la satisfacción de la demanda.



A la vista de estas circunstancias, la estrategia que se aprecia como más razonable no consiste en tratar de competir con los combustibles fósiles, sino en sacar provecho de las ventajas que su uso conlleva con objeto de hacer más atractivos los sistemas termosolares desde el punto de vista de la inversión. Esto justifica la adopción de la hibridación energía solar – gas natural como criterio de diseño de una planta Sol-Gas.

Complementar el aporte energético del sistema solar con energía fósil mejora la rentabilidad del sistema solar ya que muchos de sus componentes, como las turbinas, por ejemplo, podrían así operar de manera continua las veinticuatro horas del día y el sistema podría, además, adaptar mejor su producción a la demanda existente.

4.4.- Proyectos hibridación Sol – gas en España

En éste apartado, se va a realizar una revisión de uno los primeros proyectos en materia de hibridación de centrales termosolares para de éste modo, estar en condiciones de entender mejor el desarrollo posterior que han sufrido éste tipo de sistemas. Del mismo modo, resulta interesante comentar que en España, está permitido que en las plantas hibridadas Sol – Gas, el gas natural aporte hasta el 15 % del total de la energía eléctrica generada por la misma.



- **Andasol [64]:**

Debido al hecho de haber estudiado debidamente en apartados anteriores la plataforma Andasol, aquí solamente se va a hacer referencia a su sistema de hibridación Sol – Gas, que incorpora una turbina de gas para emplear gas natural, como aporte térmico cuando la central lo requiera, en cantidades nunca superiores, tal y como ya se ha comentado, al 15 % de la energía generada por la central.

- **Gemasolar [58]:**

Del mismo modo en que se ha hecho en el punto anterior, en éste caso se va a realizar una breve descripción del sistema de hibridación Sol – Gas con el que cuenta la planta Gemasolar, sin entrar en más detalles de la misma por haber sido ya estudiada en apartados anteriores.

Así pues, la planta Gemasolar, cuenta con una turbina de gas de 16 MWt de potencia térmica desarrollados gracias al empleo de gas natural como materia prima.

- **Proyecto Colón – Solar [120]:**

Fue concebida como la re potenciación de uno de los grupos de la Central Térmica Cristóbal Colón, situada en las proximidades de la ciudad de Huelva. Dicha repotenciación se haría mediante la adición de una turbina de gas en configuración topping y un campo solar a la planta existente.



El proyecto fue presentado al Programa Thermie de la Comisión Europea, que aportó fondos para su desarrollo. Sin embargo, los cambios en el marco legal de la generación eléctrica, hicieron inviable desde el punto de vista económico el planteamiento inicial, tal y como más adelante se detallará.

En este entorno cambiante, el proyecto evolucionó desde la idea inicial de re potenciación en configuración topping hasta la final, consistente en un ciclo combinado completamente nuevo con un campo solar integrado, en el que sólo se reutilizarían algunos elementos auxiliares de la instalación existente.

Desde el punto de vista operacional, la turbina de gas de 43 MWe de potencia nominal funcionaba a plena carga en condiciones normales. La caldera de recuperación era de doble presión, contando con dos quemadores adicionales para facilitar el control del flujo de vapor hacia la turbina de vapor en los distintos modos de operación o cuando se producían cambios bruscos en la radiación solar. La turbina de vapor, de 30 MWe de potencia nominal, era de dos etapas.

Por otro lado, el campo solar presentaba una tecnología de receptor central cuyo sistema colector estaba compuesto por 489 helióstatos de 70 m^2 de superficie reflectiva cada uno. El receptor, de 21,8 MWt de potencia térmica nominal era de vapor de agua saturado, de acuerdo con el concepto y estaba situado a 109 m sobre el nivel del suelo.



El proyecto de ejecución realizado alcanzó un gran nivel de detalle en lo que se refiere a los elementos no convencionales, como son el helióstato y el receptor. Su análisis económico estaba basado en ofertas en firme para el suministro de los distintos paquetes o subsistemas que configuran la planta, presentadas por empresas de reconocida solvencia.

De acuerdo con dichas ofertas, la inversión requerida para la ejecución del proyecto era de 47.678.290 Euros, de la que el 36 % era atribuible a la parte solar. El análisis de rentabilidad contempló, entre otras hipótesis, la posibilidad de obtener subsidios por valor de 14.526.462 Euros de diferentes programas de la Comisión Europea y la concesión de una prima de 0.09 Euros / kWh para la electricidad atribuible a la energía solar.

Las estimaciones de ventas de electricidad y costes de operación para un período de 15 años, hechas con un modelo del nuevo escenario del mercado eléctrico, mostraron que la planta Colón Solar podría ser competitiva en dicho escenario si se cumpliesen las hipótesis mencionadas en lo referente a subvenciones y primas, alcanzando una tasa interna de rendimiento (TIR) del orden del 8 %.

- **Proyecto Solgate [114]:**

El proyecto Solgate se lleva a cabo en la Plataforma Solar de Almería [55] en 2002, ubicándose en la torre CESA-I, a una altura de 60 m sobre el nivel del suelo.



El proyecto se realizó con la idea de integrar el receptor solar dentro de un ciclo Brayton con turbina de gas, mediante el uso de receptores volumétricos presurizados, dando lugar a una central híbrida Sol - Gas.

EL objetivo de formular plantas solares híbridas con turbina de gas está fundamentado en que presentan un potencial importante de reducción de costes, alcanzando valores de hasta un 30% frente a las plataformas solares puras.

La meta principal del proyecto es desarrollar un grupo de receptores solares capaces de suministrar aire a presión de 1000°C y de resolver los problemas que surjan desde el acoplamiento de los receptores con la turbina de gas convencional, demostrando la operatividad del sistema.

Los principales componentes constituyentes de éste sistema son tres módulos receptores en serie, la turbina de gas y el generador. Los primeros dispositivos se comenzaron a instalar en abril de 2002 y se finalizó en noviembre del mismo año. Tras los primeros ajustes y la instalación de los correspondientes sistemas de seguridad, se iniciaron los primeros ensayos con radiación solar el 15 de diciembre de 2002.

En estos ensayos preliminares ya se consiguió un 60% de combustión solar y se pudo comprobar que el sistema de control no tenía problemas para reaccionar adaptando el caudal de fuel incluso durante condiciones transitorias. Cuando se alcanzaron las condiciones idóneas, se introdujeron 55 helióstatos



sobre el receptor que suministraba 1MWe de potencia. En junio del 2003 se llegaron a 960°C, y la eficiencia térmica del receptor solar fue de 68-79%.

El proyecto Solgate terminó en 2003. En 2004 se siguió la campaña después de haber modificado el receptor de alta temperatura para que acepte un nivel de temperatura más alta todavía. Se llegó a una temperatura máxima de 1030°C de salida de aire en el módulo de alta temperatura.

- **Proyecto SolHyCo [115]:**

El proyecto SolHyCo fue el sucesor de los exitosos proyectos Refos, Solgate [114] y HST que desarrollaron soluciones de receptor de aire presurizado para integrar el calor solar en ciclos de gas o ciclos combinados.

El propósito principal de SolHyCo fue el desarrollo de una microturbina solar-híbrida de muy alta eficiencia para la generación tanto de electricidad como de calor que funcionaba con radiación solar concentrada y con biocarburante haciéndola un sistema completamente renovable. Otros fines del proyecto fueron estudios sobre la introducción de esta tecnología en los mercados de países soleados, en particular Argelia, Brasil, y México.

Así pues, los objetivos principales con los que se estableció el proyecto SolHyCo fueron la calibración de la medida del caudal de masa del aire con dos nuevos sistemas de medida y la acumulación de aprox. 100 horas de ensayo solar para conseguir más información sobre la durabilidad de largo tiempo de los componentes del sistema.



En la PSA [55] se hicieron las pruebas solares en dos etapas en la torre CESA-1. La primera fue en el año 2008 en el nivel de 60 m con la turbina de la empresa israelí Ormat de una potencia eléctrica de 250 kWe, que ya se operó con mucho éxito en el proyecto Solgate. Esta turbina será alimentada por tres receptores de aire de presión, uno de tubos y dos volumétricos, con una potencia térmica total de 1 MWe. La diferencia con Solgate es la sustitución del queroseno por un carburante diesel de 100% origen biológico, biodiesel.

La segunda etapa tuvo lugar en el año 2009 con una turbina de la empresa italiana/sueca Turbec de una potencia eléctrica de 100 kWe. Para esta turbina se desarrolló un nuevo tipo de receptor de aire de presión, basado en el concepto de tubos, pero con tubos de alta tecnología denominados tubos multi-capas.

4.5.- Proyectos hibridación Sol – Gas en el mundo

Del mismo modo, se van a analizar algunos de los proyectos con mayor relevancia en materia de hibridación de centrales termosolares que se encuentran ubicados en diferentes partes del mundo.

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

Dado que en el apartado dedicado a la tecnología de colectores cilindro parabólicos ya se desarrollaron convenientemente las plantas SEGS, aquí



simplemente se va a hacer alusión a la característica que presentan con respecto a la hibridación Sol – Gas.

Así pues, las plantas SEGS, fueron concebidas y realizadas con la participación de un 25 % de gas natural, de acuerdo con la legislación existente en California. Esta hibridación, permite ajustar la generación de electricidad a la curva de demanda resultando un doble beneficio:

-Para el sistema: el disponer de mayor generación eléctrica durante las horas pico, esto es, las horas en las que es necesaria una generación adicional de energía eléctrica para cubrir la demanda existente.

-Para la empresa: el percibir una retribución más alta por la generación eléctrica durante esas horas.

- **Primera central termosolar híbrida de Florida, América [137]:**

Florida Power and Light y su filial NexEra Energy, inauguraron en Marzo de 2011 la primera central termosolar híbrida de Florida, en el Norte de América.

El campo solar que ocupa cerca de 250 hectáreas se construyó junto una central ya existente de gas natural en Martin, Florida. La central termosolar aporta el equivalente a 75 MWe y el vapor producido en la instalación se incorpora a la central de ciclo combinado de gas natural. La energía eléctrica generada a partir de la energía aportada por la parte solar de esta instalación será



de 155 GWh y la reducción provocada en la emisión de gases de efecto invernadero será de cerca de 2 millones de toneladas durante 30 años de operación si comparamos con la parte de gas natural sustituido por la energía solar en la misma central.

Así pues, la planta, constituida por 180.000 heliostatos será capaz de producir la electricidad suficiente para abastecer a 11.000 hogares.

- **Planta híbrida Sol – Gas en Marruecos [138]:**

La planta híbrida Sol – Gas ubicada en Ain Beni Mathar, en Marruecos y construída por Abengoa Solar [50] es la planta solar de ciclo combinado más potente del mundo y comenzó a funcionar en Abril del año 2010. La compañía española Abener [54], entidad de Abengoa, líder en ingeniería y construcción de plantas eléctricas, fue la ganadora de una licitación pública internacional convocada por la Oficina Nacional de Electricidad (ONE) de Marruecos para la construcción, operación y mantenimiento de esta central híbrida solar de ciclo combinado. El proyecto, supone una inversión por parte del promotor, ONE la empresa eléctrica de Marruecos, de unos 400 millones de euros.

El acuerdo con ONE, han explicado las mismas fuentes, queda plasmado en el contrato para la construcción de la central y la operación de la misma durante los cinco primeros años de funcionamiento. Para la ejecución de este contrato Abener ha organizado un equipo de proyecto con dedicación exclusiva, que cuenta con unas setenta personas, sin incluir las que se ocuparán de la operación una vez construida la central, en su gran mayoría ingenieros, técnicos



y personal auxiliar de nacionalidad española y marroquí.

Por el momento, esta planta abastecerá a Marruecos. Aunque, según las fuentes consultadas, en el futuro el Norte de África, y Marruecos en concreto, tendrán la oportunidad de construir plantas solares que puedan cubrir las necesidades de energía limpia pero también exportar electricidad a Europa. Esto tendría grandes ventajas socio-económicas para Marruecos y permitiría reducir el coste de la electricidad solar consumida localmente.

- **Planta híbrida Sol – Gas en Hassi-R'mel en Argelia [139]:**

La planta híbrida de ciclo combinado Sol – Gas, ubicada en Hassi-R'mel, Argelia, está en operación desde julio de 2011. La planta Hassi-R'mel, sitúa a Abengoa como una de las compañías pioneras en la construcción y operación de plantas solares en el Norte de África, siendo ésta la segunda planta híbrida Sol – Gas que construye hasta el momento.

Esta planta de tecnología solar híbrida con ciclo combinado, tiene 150 MWe de potencia eléctrica, de los que 20 MWe proceden de un campo compuesto de 224 colectores cilindro parabólicos que emplean como fluido de trabajo aceite térmico y que abarcan una superficie reflectante de 180.000 m². La novedad del proyecto está en el aprovechamiento eléctrico del calor generado en la misma turbina de vapor que aprovecha el calor residual de la turbina de gas, lo que se conoce como cogeneración. De éste modo se tiene una central termosolar que implementa en sus instalaciones sistemas de cogeneración e hibridación.



Abengoa y New Energy Algeria (NEAL) [140], explotarán la central híbrida durante un periodo de 25 años para Sonatrach, principal compañía de hidrocarburos de Argelia.

- **Agua Prieta II. Planta híbrida Sol – Gas en Mexico [141]:**

La localidad mexicana de Agua Prieta es el lugar elegido para construir y poner en funcionamiento la tercera planta termosolar híbrida Sol - gas de Abengoa [50] que actualmente se encuentra en fase de construcción. La central toma el nombre del municipio donde se ubica y se llamará Agua Prieta II. Entrará en funcionamiento en Abril del año 2013, aproximadamente.

El proyecto, pionero en México, ha sido promovido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) del país, y ha contado con el apoyo del Programa de Desarrollo de Naciones Unidas “Global Environment Facility” (GEF). Abengoa acometerá la ingeniería, el diseño y la puesta en servicio de la tecnología híbrida Solar - Gas compuesta por un campo solar de colectores cilindro parabólicos de 12 MWe.

La segunda fase del proyecto se completará con un ciclo combinado capaz de producir hasta 464,4 MWe, que constará de dos turbinas de gas, una de vapor, un recuperador de calor, sistemas de enfriamiento, condensado y alimentación, y equipos y sistemas auxiliares.

La central termosolar de Agua Prieta II es la primera central híbrida Sol - Gas de México, y la tercera que Abengoa lleva a cabo en todo el mundo. Las dos



primeras, situadas en Marruecos, de 470 MWe y Argelia, de 150 MWe ya están prestando servicio y se han posicionado como las primeras y mayores centrales híbridas con tecnología Integrated Solar Combined Cycle, ISCC, según sus siglas en inglés.

- **Proyecto Kuraymat, Egipto [142]:**

Iberdrola Ingeniería ha puesto en marcha en Egipto la central de Kuraymat, de 150 MWe de potencia eléctrica. La construcción de este ciclo combinado híbrido es fruto del contrato llave en mano por 150 millones de Euros que le adjudicó el Gobierno egipcio, a través de la New Renewable Energy Authority (NREA) [143], a la compañía en septiembre de 2007, tras participar en un concurso público internacional.

La planta está constituida por un campo solar de 130.800 m², con 160 colectores cilindro parabólicos y 1.900 m² de superficie de espejos.

La nueva planta de generación eléctrica puesta en servicio por la filial de ingeniería y construcción de Iberdrola en Egipto, será capaz de suministrar energía a alrededor de 200.000 personas y evitará la emisión anual a la atmósfera de 16.000 toneladas de CO₂. Asimismo, la aportación de la energía solar a la producción eléctrica global de la central de Kuraymat, en cuya construcción han trabajado durante más de tres años unos 1.000 operarios, permitirá un ahorro de 5.000 toneladas al año de gas natural.



4.6.- Hibridación Sol - biomasa

Como ya se ha comentado anteriormente resulta altamente interesante contar con una fuente alternativa de generación de energía eléctrica además de la radiación solar, para poder cubrir transitorios o para proporcionar un aporte extra de producción de electricidad cuando sea requerida.

Sin embargo, además del empleo de gas natural como combustible alternativo, actualmente se está investigando acerca del empleo de biomasa como combustible de apoyo para las centrales termosolares, de nuevo centrales de torre y de colectores cilindro parabólicos.

La biomasa, tal y como más adelante se detallará convenientemente, resulta ser la única fuente de energía natural, renovable y fácilmente almacenable, características que desde luego la convierten en una alternativa más que viable al gas natural.

4.7.- Proyectos hibridación Sol – biomasa en España

Con el objetivo de tener mayor conciencia del estado de desarrollo en el cual se encuentra la tecnología actual en materia de hibridación de empresas de energías renovables, se va a realizar un análisis de dos de los proyectos más importantes que están teniendo lugar en la actualidad, como lo son el llevado a cabo por Abantia [121] y



Comsa Emte [122], en colaboración con el CTAER [123] y el proyecto desarrollado por Solarlite [124] y Sialsol [125].

- **Proyecto desarrollado por Abantia, Comsa Emte y CTAER [126]:**

Abantia y Comsa Emte, en colaboración con el Centro Tecnológico Andaluz de Energías Renovables, CTAER, de aquí en adelante, iniciaron en Abril de 2011 la construcción de una planta que combinará solar termoeléctrica y biomasa y que desarrollará una potencia eléctrica de 22,5 MWe y que se encontrará ubicada en Les Borges Blanques, Lleida. Se trata de la segunda iniciativa de este tipo que se conoce en España. La otra la llevan a cabo Solarlite y Sialsol, en la provincia de Badajoz, donde se quiere aprovechar una central abandonada de biomasa para incorporarla a una termoeléctrica con generación directa de vapor.

Así pues, el CTAER comenzó a trabajar en Abril de 2011 en la hibridación de la energía solar con la biomasa con el desarrollo del proyecto 'Investigación y desarrollo de una metodología para el diseño optimizado de centrales termoeléctricas híbridas sol-biomasa', para el que se ha conseguido completar la financiación tras la aprobación de un incentivo de la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia a los Agentes del Sistema Andaluz del Conocimiento.

Según informa la entidad, esta apuesta tecnológica de futuro surgida a propuesta de su presidente, Valeriano Ruiz, contará con una inversión total de 153 millones de Euros, de los que el CTAER aportará el 37.4%, que traducido



serán 1.751.113 Euros, procedente de los fondos privados del centro tecnológico, mientras que la junta abonará el 62.6% restante.

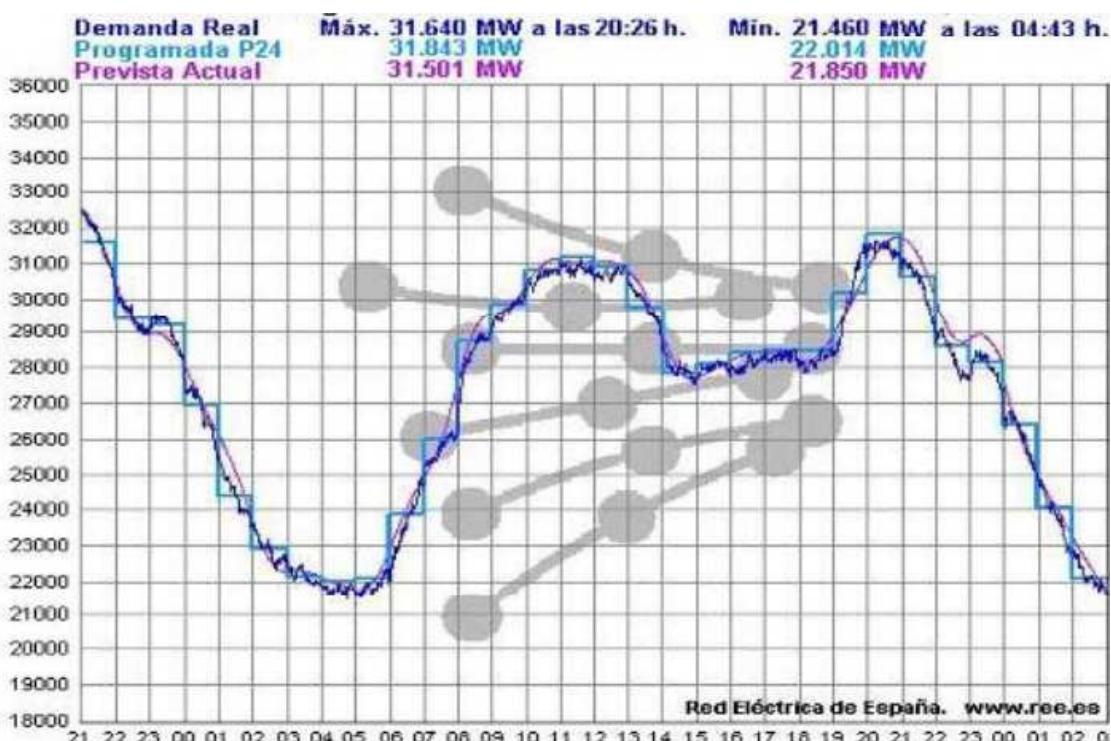
Este proyecto de diseño tecnológico será desarrollado a lo largo de 30 meses por investigadores del CTAER, Abantia y Comsa Emte. Además será dirigido por un equipo de ingenieros que ya estuvieron implicados en los primeros programas experimentales, Colón Solar, Sol-Gas y CESA-2, que, si bien estos no llegaron a materializarse, sentaron las bases para los avances posteriores.

En esta fase inicial, el CTAER establecerá las características básicas y la ingeniería de una central termoeléctrica híbrida solar-biomasa de carácter experimental, a fin de que en una segunda etapa sólo haya que construirla, medirla y evaluarla, para que las empresas hagan de ella un producto comercial. Los trabajos previstos incluyen una etapa de experimentos para analizar el comportamiento de algunas partes importantes del proceso, como el gasificador alimentado por biomasa y el sistema de potencia al que se tendrán que acoplar las dos tecnologías de energías renovables, es decir, la solar y la de biomasa. El resultado final se plasmará en un software de simulación de una planta piloto para su desarrollo industrial.

El proyecto también incluye la elaboración de un método económico que permitirá describir con precisión la rentabilidad de plantas híbridas así como una herramienta de soporte informático complementaria. En este sentido, el CTAER se ha mostrado especialmente interesado en sistemas híbridos solar-biomasa,

sobre todo para su aplicación en la generación de electricidad y en generación distribuida y con cogeneración para el aprovechamiento de calor y de frío.

Por otro lado, clave en estas plantas resulta ser el ajuste de la curva de demanda con sus dos picos, centrados en medio día uno, y sobre las 20.00 horas el otro. A continuación se muestra un gráfico de la curva de demanda a lo largo de un día para tener real constancia de esos dos picos mencionados.



Gráfica 6. Demanda de electricidad a lo largo de un día [127].

En opinión del presidente del CTAER, "el sistema eléctrico del futuro se tiene que basar en energías renovables y, sin duda, la solar debe ser la base de ese sistema, bien sea con fotovoltaica, bien con solar termoeléctrica. En este último caso, es necesario que se complemente con una fuente almacenable que haga gestionable el conjunto; es obvio que la biomasa es la renovable



almacenable, por lo que una hibridación solar-biomasa resulta ser la solución ideal".

De momento, la planta de Lleida se prevé que esté construida a finales de 2012 y que entre en funcionamiento en enero de 2013. La captación de rayos solares durante las horas de sol, tendrá lugar mediante tecnología de colector cilíndrico parabólico, con 336 dispositivos y se complementará durante la noche con el funcionamiento de la biomasa, cuyo combustible principal será la biomasa forestal, el cultivo energético y los residuos agrícolas. Otros datos ofrecidos sobre la misma planta hacen referencia a la producción de 98.000 MWh, equivalente al consumo medio de más de 27.000 hogares, y a la creación de 30 empleos directos y 150 indirectos. Del mismo modo, evitará la emisión a la atmósfera de 24.500 toneladas de CO₂ al año.

Dentro de las renovables, el grupo Abantia está más centrado en la solar y Comsa Emte tiene un mercado más diversificado, que incluye la biomasa. En la actualidad, en colaboración con el Ayuntamiento de Tremp, Lleida y el Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC) [128], lleva a cabo una prueba piloto de cultivo de chopos con el objetivo de estudiar la viabilidad de estos árboles como combustible para una planta de biomasa que la compañía pretende construir en la zona. Comsa Emte Medio Ambiente ha arrendado una finca de nueve hectáreas de regadío que reúne las condiciones para el correcto desarrollo del proyecto.



Actualmente, en España no existe ninguna central solar termoeléctrica que hibride con biomasa, las centrales en funcionamiento tienen una pequeña hibridación con gas natural porque la legislación española actual permite utilizar hasta un 15 % de gas natural para absorber las variaciones de radiación solar y así mejorar la gestionabilidad de las centrales, si bien se ha puesto la primera piedra para la construcción de una central híbrida solar-biomasa en Les Borges Blanques, tal y como ya se ha comentado.

A escala internacional, también se implanta esta tecnología en Marruecos, Egipto y Argelia, con participación de empresas españolas.

- **Proyecto desarrollado por Solarlite y Sialsol [129]:**

Sialsol como ingeniería y Solarlite como socio tecnológico se encuentran en fase de desarrollo de una central termosolar con dos características que la diferencian sustancialmente de las actuales instalaciones comerciales, por un lado se trata de una central con generación directa de vapor (GDV) y por otro lado, se complementa con una planta de biomasa.

El proyecto consiste en el aprovechamiento de una central abandonada de biomasa que se localiza en la provincia de Badajoz y que reúne las condiciones idóneas para el suministro de agua y combustible, al estar próxima a una masa arbolada y a un embalse.

Pablo Hernández, responsable de proyectos de Sialsol, afirma que desde el primer momento, se identificó a la biomasa como compañera perfecta de la



GDV; no en vano, la normativa vigente admite para este modelo de hibridación una producción eléctrica de hasta un 50%. Sendas plantas, termosolar y biomasa, compartirían el mismo emplazamiento en Badajoz, puesto que los equipos de producción eléctrica del bloque de potencia son comunes: turbina, condensador, desgasificador, intercambiadores, bombas, etc.

De éste modo, la novedad de ésta tecnología residen en la caldera para la combustión de biomasa. En la actualidad hay dos fórmulas de operación. Una es en paralelo, produciendo el vapor en el campo solar y en la caldera para, una vez mezclado de forma controlada, obtener las condiciones que requiere la turbina. La otra consiste en introducir en el horno de calor el vapor generado en los colectores para aumentar la presión y la temperatura, hasta alcanzar un rendimiento idóneo. Esta última es la opción que quieren desarrollar en Badajoz.

Este tipo de plantas híbridas es para muchos expertos la opción más renovable y sostenible que puede presentar la termosolar. Lo lleva diciendo desde hace mucho tiempo Valeriano Ruíz, presidente de Protermosolar.



ANEXO V: Obtención de

combustibles biomasa

5.1.- Introducción

Se ha creído conveniente, tal y como se mencionaba en el apartado correspondiente a la hibridación, la elaboración de un anexo en el cual se desarrollos los principales proyectos que están siendo llevados a cabo en la actualidad en materia de obtención de combustibles biomasa, debido a ser la alternativa más interesante de las barajadas en cuanto a la hibridación de los dispositivos de disco Stirling se refiere.

5.2.- Obtención de combustibles biomasa

Con el objetivo de impulsar el desarrollo de las energías renovables, y más concretamente de las plantas hibridadas con el empleo de la biomasa, numerosas instituciones se han puesto en marcha en el desarrollo de proyectos para la creación y cultivo de cultivos energéticos con el fin de ser empleados como biomasa.

A continuación, se va a realizar un repaso acerca de los principales proyectos de ésta índole que están siendo llevados a cabo en la actualidad.



- **Lignocrop [130]:**

La iniciativa Lignocrop, liderada por Iberdrola Renovables [98], cuenta con la participación del Centro de Investigación Forestal (INIA-CIFOR) [131], el Instituto Valenciano de Investigación Agraria (IVIA) [132] y la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), así como con la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación a través del Plan E.

El alcalde de Peñafiel, Félix Ángel Martín, y el director regional de la compañía en Castilla y León, Fernando Martínez Riaza, han intervenido en la demostración de la fase inicial de dicho proyecto y en las labores de plantación en los terrenos de este municipio vallisoletano.

Con un presupuesto que asciende a cerca de 3.000.000 Euros, contempla la plantación de un total de 55 hectáreas de cultivo energético leñoso en tres ubicaciones geográfica y meteorológicamente muy distintas: Peñafiel, Archidona (Málaga) y Molina de Aragón (Guadalajara).

Los géneros seleccionados son Populus, Salix, Robinia y Paulownia, este último solamente para Archidona.

La compañía, líder mundial en el sector de las energías renovables, ha elegido Castilla y León para lanzar este innovador proyecto de investigación y desarrollo, que cuenta con el apoyo de la Junta de Castilla y León y el citado municipio vallisoletano.



En Peñafiel, van a ser plantados chopos, sauces y robinias en unas 14 hectáreas durante seis años, en ciclos de corta rotación, de unos tres años aproximadamente.

Lignocrop es la primera iniciativa que desarrolla un estudio sobre la optimización de toda la cadena logística de los cultivos energéticos: selección genética de los mismos, producción de la planta en el laboratorio, crecimiento en los emplazamientos más adecuados, proceso de recolección y preparación, acondicionamiento de la biomasa y entrega en la central eléctrica.

- **Ingelia [133]:**

Ingelia, una joven empresa de la Comunidad Valenciana dedicada a las energías renovables y la investigación ha puesto en marcha esta novedosa planta.

El objetivo primordial de la instalación de la planta es transformar materia orgánica de cualquier tipo en un combustible de alto poder calorífico, de unas 6.000 Kcal/kg aproximadamente, mediante un proceso conocido como carbonización hidrotermal, una tecnología cuyo fundamento consiste en conseguir deshidratar la biomasa para concentrar el carbono, que es donde se encuentra el poder calorífico de la materia orgánica, así lo ha explicado Marisa Hernández, Consejera Delegada de Ingelia y una de los tres socios fundadores.

La planta de Ingelia se encuentra en el municipio valenciano de Náquera y trata 2.000 toneladas al año de biomasa puesto que al ser también una



instalación de I+D realizan pruebas y ensayos continuamente.

La planta puede tratar una amplia variedad de biomasas con cualquier porcentaje de humedad: leña, ramas, hojas y raíces de pino, olivo, adelfas, aloe, restos agrícolas, de frutales y verduras o incluso lodos de depuradora. Como el proceso de deshidratación tiene lugar en un medio líquido, la humedad inicial de la biomasa no es determinante, aunque cuanto menor sea, mayor cantidad de carbón se obtendrá de un mismo volumen de biomasa. Si la biomasa llega con tierra o piedras, se hace un prelavado en una piscina con agua antes de su trituración. El tamaño de astilla suele estar entre los 15-20 cm para que pueda ser bombeada correctamente.

Gracias a un convenio con el Ayuntamiento de Náquera, reciben restos de podas de jardinería, tanto municipales como de particulares, y de aprovechamientos forestales. Cabe recordar que el municipio se encuentra dentro del parque natural Sierra Calderona, con 18.000 hectáreas de bosque mediterráneo dominado por el pino carrasco, con importante riesgo de incendio si se acumula biomasa en exceso.

El proceso tiene lugar en un reactor de flujo invertido en cuyo interior hay un medio líquido, unas condiciones de proceso de 20 bar de presión y 180-200 °C de temperatura y un catalizador específico para cada tipo de biomasa. Antes de entrar en el reactor de flujo invertido desde la tolva, un tornillo sinfín conduce la biomasa astillada al grupo de bombeo donde se mezcla con agua y el catalizador y se precalienta (con calor sobrante de proceso). Las condiciones de



proceso se alcanzan gracias a una caldera alimentada con carbón producido en la planta. En estas condiciones, tiene lugar una fase de monomerización de la materia orgánica, seguida de un proceso de polimerización tras el que se obtiene un carbón deshidratado con un elevado poder calorífico y agua por unión de las moléculas de H y O que han perdido las cadenas de hidrocarburos.

Al finalizar el proceso, que puede durar 10 horas, el carbón inerte sale del reactor mezclado con agua. Tras la separación del agua, el carbón sigue «mojado» pero molecularmente seco. No es necesario aplicarle ninguna fuente de calor para que termine de secarse, pero con un secado mecanizado se lograría reducir la humedad al 5 %.

El carbón seco es muy ligero y fácil de moler; es apto para combustión en calderas industriales, para combustión en centrales térmicas, también se puede peletizar, solo o con serrín de madera para aumentar su poder calorífico. El único subproducto obtenido del proceso es agua apta para fertilizar.

Ingelia colabora con el Instituto Max Planck, en Munich, que comenzó a estudiar esta tecnología en laboratorio en el año 2005. Tras dos años de trabajo, comenzaron la construcción del reactor a escala industrial para comprobar la viabilidad comercial de la tecnología. La planta empezó a funcionar en julio de 2010 y es la primera de Europa en utilizar la tecnología a escala industrial.

En el proyecto colabora el Instituto de Tecnología Química (ITQ) [134]. La mitad del capital lo aporta Ingelia y la otra mitad se financia con créditos a



largo plazo del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) [135] y de la Empresa Nacional de Innovación, S.A., (ENISA) [136]. La Consellería de Industria de la Generalitat Valenciana, a través del IMPIVA, y la de Infraestructuras y Transportes, a través de AVEN, han concedido subvenciones para la construcción de la planta.

En la actualidad, la empresa participa en un proyecto con la Consellería de Industria para investigar la combustión del carbón en polvo en calderas ya existentes y para analizar el comportamiento del carbón peletizado.

Por último y con el objeto de dejar patentes las características diferenciadoras de dos combustibles en particular, biomasa y gasoil, se van a recoger a continuación algunos de los valores más importantes que presentan éste tipo de sistemas. Para ello se ha optado por una presentación según dos cuadros distintos.



El primero contiene los parámetros básicos de una instalación que funciona con biomasa de entre 50.000 – 1.500.000 Kcal/h de potencia, alimentada con hueso de aceituna comparándose con una de gasoil con la misma potencia.

COMPARACIÓN DE PARÁMETROS BÁSICOS BIOMASA / GASOIL

PARÁMETROS	TIPO DE CALDERA		
	BIOMASA	PIROTUBULAR	GASOIL
Potencia (Kcal/h)	ACUOTUBULAR Desde 50.000 a 1.500.000	PIROTUBULAR Desde 50.000 a 1.500.000	ROCA CPA 500, 500M Desde 50.000 a 1.500.000
Potencia (kW)	58 - 1.744,2	58 - 1.744,2	58 - 1.744,2
Rendimiento	85%	83%	92%
Combustible	Hueso de aceituna	Hueso de aceituna	Gasóleo
PCI combustible (Kcal/kg)	4.000 kcal/kg	4.000 kcal/kg	9.500 Kcal/kg
Vida útil	20 años	30 años	-

Fuente: AGENER S.A., 2007.

Tabla 2. Comparación de parámetros básicos biomasa /gasoil.

COMPARATIVA BIOMASA / GASOIL

	BIOMASA	GASOIL
INVERSIÓN (€)	50.000	21.800
EXPLOTACIÓN (€/año)	11.167	22.109
COSTE ENERGÉTICO (€/MWh)	12,8	46,38
AMORTIZACIÓN BIOMASA	3,67	

Fuente: AGENER S.A., 2007.

Tabla 3. Comparativa costes biomasa / gasoil.

Así pues, resulta más que significativa la diferencia entre los costes energéticos en función de tratarse de biomasa o gasoil, siendo prácticamente un 73 % superiores para este último.