



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

Grado en Ingeniería Electromecánica

Especialidad Eléctrica

# **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONVERSIÓN DE CALOR EN ENERGÍA ELÉCTRICA**

Autor: Sara Jiménez Herráez

Director: Patrick Debay

Madrid

Junio 2016



## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO ABIERTO ( RESTRINGIDO) DE DOCUMENTACIÓN**

### **1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.**

El autor Dña. Sara Jiménez Herráez , como Ingeniero Electromecánico de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA**

que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra “Desarrollo de un sistema de conversión de calor en energía eléctrica”, proyecto fin de Grado, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

### **2º. Objeto y fines de la cesión.**

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita (con las limitaciones que más adelante se detallan)* por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

### **3º. Condiciones de la cesión.**

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

(a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.

(b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato. .

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.<sup>1</sup>

(d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital.<sup>2</sup>

#### **4º. Derechos del autor.**

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.

b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.

c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación ([curiarte@rec.upcomillas.es](mailto:curiarte@rec.upcomillas.es)).

d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.

d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

#### **5º. Deberes del autor.**

---

<sup>1</sup> En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría redactado en los siguientes términos:

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo institucional, accesible de modo restringido, en los términos previstos en el Reglamento del Repositorio Institucional

<sup>2</sup> En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría eliminado.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

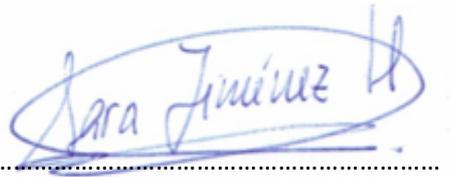
**6ª. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- a) Deberes del repositorio Institucional:
  - La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
  - La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
  - La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:
  - retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 20 de Mayo de 2016

**ACEPTA**



Fdo.....

Proyecto realizado por el alumno/a:

Sara Jiménez Herráez

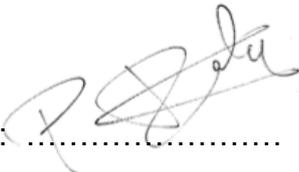
Fdo.:  .....

Fecha: 20 / 05 / 2016

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter  
confidencial

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Patrick Debay

Fdo.:  .....

Fecha: 17 / 05 / 2016

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fernando de Cuadra García

Fdo.: .....

Fecha: ..... / ..... / .....





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
Grado en Ingeniería Electromecánica  
Especialidad Eléctrica

# **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONVERSIÓN DE CALOR EN ENERGÍA ELÉCTRICA**

Autor: Sara Jiménez Herráez

Director: Patrick Debay

Madrid

Junio 2016



# RESUMEN

En la **Introducción** del presente Proyecto de Fin de Grado se expone que el sector secundario es un importante consumidor de energía. Muchas industrias devuelven una cantidad de calor al entorno que queda sin explotar. Este calor constituye una fuente de energía renovable que sería posible aprovechar con un sistema apropiado.

La motivación de poder responder a esta problemática, ha hecho que la empresa FIMATEC Ingénierie lanzase un proyecto de innovación en colaboración con la universidad. El objetivo de éste era encontrar nuevas soluciones no disponibles en el mercado actual, lo cual destaca las virtudes innovadoras del proyecto.

Sin embargo, la temperatura de ese calor disipado no es lo suficientemente elevada como para utilizarla de forma eficaz en los motores que se alimentan de calor (su rendimiento aumenta con el gradiente de temperatura entre los focos caliente y frío). Por este motivo, se estudia implementar un sistema que incluya o bien una bomba de calor o bien el ciclo de Brayton inverso para aumentar esa temperatura. Una vez esa temperatura sea cercana o superior a los 80°C, un motor Stirling se encarga de transformar esa energía calorífica en energía mecánica. Para terminar, con ese movimiento de rotación, un alternador trifásico permite la obtención de energía eléctrica que puede almacenarse en baterías o ser reinyectada en la red.

Si bien el primero de los objetivos es disponer de una tecnología capaz de aprovechar la energía desperdiciada en forma de calor, también se pretende hallar una forma alternativa de climatización para las industrias cuyo calor a disipar moverá el sistema, lo cual justifica que ese calor que se desaprovecha pueda ahora tener un nuevo uso. Se ha tomado como referencia un Data Center que desprende 150 kW de calor.

Actualmente, la electricidad se obtiene principalmente de la quema de combustibles fósiles. Están surgiendo proyectos innovadores que relacionan termodinámica con electricidad, es decir, proyectos que plantean recuperar calor para convertirlo en energía eléctrica. Así, se ofrecen alternativas menos contaminantes aunque, por el momento, de bajo rendimiento. Este Proyecto busca precisamente la producción de electricidad de manera más ecológica y con menor impacto en el medio ambiente, a través de la explotación del calor desperdiciado y su reutilización.

El sistema resultante de este Proyecto (bomba de calor o ciclo de Brayton inverso, junto a un motor Stirling y un alternador) no se puede adquirir en ningún negocio actual, pero sí los elementos que lo constituyen –aunque se usan para otros fines–. Por ejemplo, la bomba de calor se emplea en el campo del confort (residencias, hoteles y hospitales), aunque también tiene cabida en la industria (climatización y calefacción, igual que en el sector doméstico y además procesos de calentamiento de agua o de secado de tabaco, madera...).

En cuanto al ciclo de Brayton inverso, tiene aplicación para procesos de climatización (entre otros, las aeronaves) y también en criogenización, pues dada su estructura puede alcanzar temperaturas extremas. En realidad, en los aviones, es el mismo compresor de propulsión el que actúa, por una parte, con una cámara de combustión y una turbina de gas y, por la otra, con un intercambiador de calor y turbina, de donde se obtiene el aire frío para climatizar la cabina. La diferencia es que, en este Proyecto, el ciclo de Brayton inverso se alimenta con un motor eléctrico dado que, al no trabajar con combustión de gas, la turbina no suministra trabajo suficiente para hacer funcionar el sistema.

El motor Stirling tiene también diversas aplicaciones: puede trabajar con prácticamente cualquier fuente de calor. Una de las más conocidas es el *SunCatcher* (Figura 1). Se dispone de un disco que recibe la energía del sol y es capaz de producir electricidad sin contaminación. En cuanto a su funcionamiento, tiene lugar gracias al concentrador solar y a la unidad de conversión de potencia, situada en el brazo receptor del disco. Esta unidad consta de cuatro cilindros con hidrógeno que se expande cuando el calor de los rayos solares alcanza la unidad. Se producen un máximo de 1.800 rpm y una tensión de 480 V a 60 Hz.



**Figura 1: Imagen del SunCatcher, fabricado por Stirling Energy Systems**

También se ha empleado el motor Stirling en aplicaciones espaciales. Su simple construcción y su alto grado de versatilidad los hacen ideales para largos períodos de uso. De manera adicional, no producen ningún tipo de residuo.

Para terminar, el alternador se usa en cualquier aplicación que precise de la conversión de energía mecánica en electricidad, gracias a la inducción electromagnética. En función del sistema del que forme parte, puede ser un generador síncrono, asíncrono o, como finalmente se ha escogido en el presente Proyecto, un alternador trifásico de vehículo.

La **metodología** detalla las tareas orientadas a la consecución de los objetivos anteriores. Para empezar, se ha realizado un estudio de la viabilidad técnica, con balances de energía y estudios de rendimiento; una vez analizados los posibles sistemas,

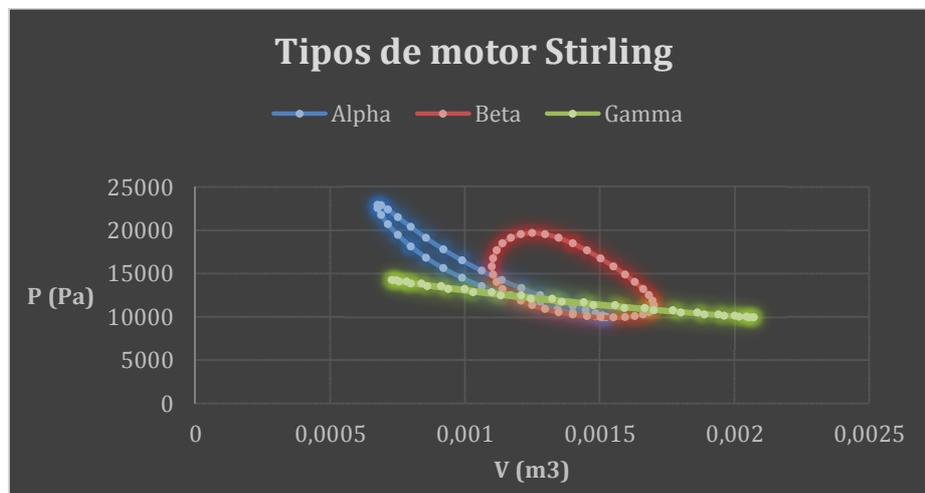
tuvo lugar el estudio de la optimización, donde se contactó con empresas y se valoró cómo distribuir la electricidad que era capaz de obtener el sistema. Finalmente, se estimó el coste de la inversión que habría que afrontar para poner en marcha el sistema y ver si era económicamente ejecutable.

A mitad del desarrollo del Proyecto, se llevó a cabo una sesión de *co-design*, en la que participaron profesionales y expertos en la materia. Esta jornada se orientó a la solución de las problemáticas encontradas.

Como muestran las tareas enumeradas, este Proyecto tiene por objetivo desarrollar una idea innovadora de un producto final que aún no existe en el mercado pero tiene cabida en él. Por este motivo, el análisis de la viabilidad técnica del conjunto tuvo un papel importante en la evolución del trabajo. Del mismo modo, se estudió con detalle y de forma independiente el rendimiento de cada componente del equipo.

Los **resultados** prueban que el rendimiento teórico del motor Stirling no puede alcanzarse en las condiciones de las Bases del Proyecto, aunque se ha intentado mejorar variando las temperaturas de los focos frío y caliente y la relación de compresión.

En la siguiente gráfica se comparan los trabajos del motor según el tipo (alfa, beta o gamma). El trabajo es el área encerrada por las curvas que relacionan la presión del cilindro con la variación de su volumen.

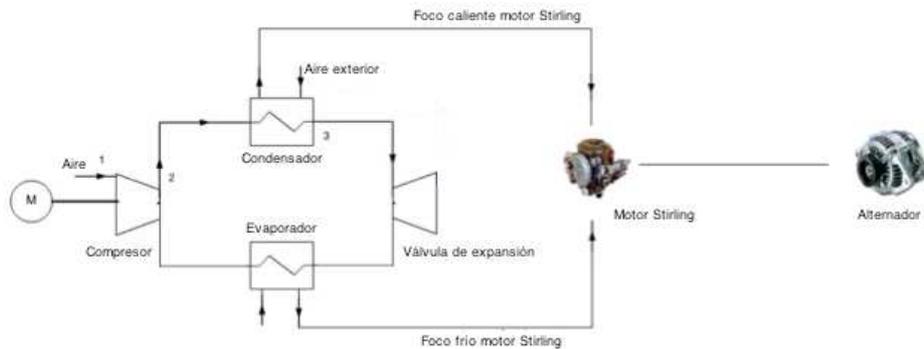


**Figura 2: Comparativas del trabajo del motor Stirling según su clase**

Se decide trabajar con un motor tipo alfa, dado que el movimiento que se produce es de rotación en lugar de traslación (como es el caso del motor beta y el gamma) y el trabajo útil,  $W_i$  –diferencia entre trabajo de expansión,  $W_e$ , y trabajo de compresión,  $W_c$  – es el mayor de los tres.

	Alfa	Beta	Gamma
$W_e$ (J)	4,7087	2,2766	1,0019
$W_c$ (J)	-3,4550	-1,6705	-0,7352
$W_i$ (J)	1,2537	0,6061	0,2668
Potencia (W)	20,8947	10,1024	4,4459

La solución propuesta que incluye una bomba de calor que sirva de foco caliente y foco frío del motor Stirling requiere que su COP (*Coefficient of Performance*) se encuentre entre unos valores de 4 y 5 para optimizar el rendimiento del sistema. Para cumplir lo anterior, las temperaturas de los focos deben ser de 73 y de 20°C.

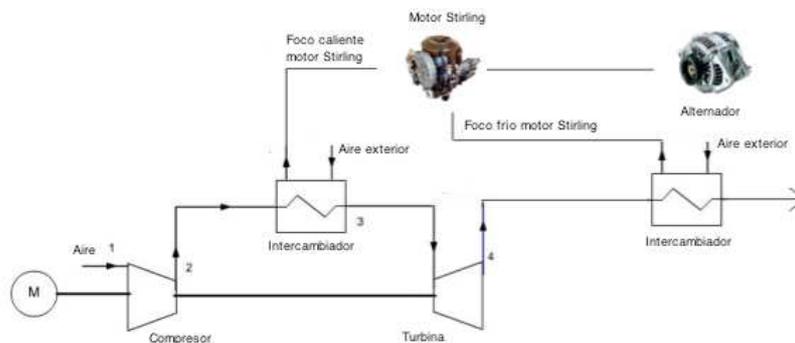


**Figura 3: Esquema del sistema bomba de calor y motor Stirling**

En estas circunstancias se podrían obtener hasta 54 kW eléctricos a la salida del alternador. Los resultados obtenidos justifican que el consumo de la bomba es elevado según lo que se produce, pero se economiza en comparación con una climatización clásica. La temperatura del foco frío para el motor Stirling es la que se devuelve a la sala. La siguiente tabla muestra el resumen de las potencias consumidas y generadas.

Mecánica de compresión	Eléctrica consumida	Calorífica creada	Eléctrica creada
-185 kW	-264 kW	700 kW	54,43 kW

La solución compuesta por el ciclo de Brayton inverso resulta en una inversión económica más importante, pero puede conseguirse un mayor gradiente de temperatura.



**Figura 4: Esquema del sistema ciclo de Brayton inverso y motor Stirling**

Los resultados del estudio de esta solución son:

$W_C$	$W_T$	Calor aportado al motor	W del motor	$W_C + W_T$	$W_C + W_T + W_{MS}$	$W_{ELEC}$
-193,832 kW	87,218 kW	-168,424 kW	34,403 kW	-106,615 kW	-72,211 kW	58,49 kW

Donde para las dos situaciones (bomba de calor y ciclo de Brayton inverso) se ha supuesto un rendimiento del 90% para el alternador y un 90% para la reductora.

La elección del tipo de máquina eléctrica se ha tomado de acuerdo a las ventajas y desventajas mostradas en la siguiente tabla. Según el contexto de este Proyecto se ha tomado la decisión de emplear un alternador trifásico típico de un vehículo IVECO.

	Batería			Conexión a red		
	Máquina síncrona	Máquina asíncrona	Alternador trifásico	Máquina síncrona	Máquina asíncrona	Alternador trifásico
<b>Ventajas</b>	Excitación CC disponible siempre	-	Excitación CC disponible siempre Funcionamiento normal	Funcionamiento normal	Funcionamiento normal	-
<b>Desventajas</b>	No hay control de velocidad del motor Adición de rectificador	No puede funcionar en isla Adición de rectificador	Menor potencia que las otras alternativas	Adición de batería para disponer de excitación	-	Precisan de batería para funcionar bien Adición de inductor y transformador

De este modo, se va a almacenar la electricidad obtenida del proceso en una batería. No puede emplearse una máquina síncrona porque no existe un control de velocidad para el motor Stirling y la máquina de inducción sólo permite la devolución de la energía a la red.

Las **conclusiones** de llevar a cabo el Proyecto plantean un balance final del estudio. También establecen que, aunque ambos sistemas retenidos por FIMATEC son técnicamente factibles, la referida al ciclo de Brayton inverso no es económicamente viable. Solamente el compresor asciende a más de 156.000 €, mientras que el precio de la bomba de calor seleccionada es de 16.070 €. Además, todos los elementos del ciclo de Brayton inverso habría que adquirirlos por separado, pues tal sistema no está disponible en el mercado actualmente.

Aunque la generación de electricidad con el sistema de la bomba de calor continúa siendo baja, supondría una disminución del consumo eléctrico con respecto a una climatización clásica. Parece esto suficiente y razonable para justificar que esta solución podría remplazar los sistemas de refrigeración existentes en las industrias.



# ABSTRACT

The **Introduction** of this Final Degree Project shows that industries consume a great amount of energy. Most of them reject heat waste to the environment and it stays therefore unutilized. This heat is in fact a source of renewable energy that would be possible to employ with the appropriate system.

To answer to this problematic, the firm FIMATEC Ingénierie has proposed an innovative project in collaboration with the University. The aim of this projet was to find new solutions unavailable in the current market, which enhances the innovative virtue of this Project.

However the exit temperature of the above-mentioned heat waste is not high enough to be used in an efficient way within the existent heat engines. This is the reason why a new system is analyzed. The proposed system will include whether a heat pump or a reversed Brayton cycle in order to increase this temperature. Once it is close to or greater than 80°C, a Stirling engine is in charge of transforming this heat energy into mechanical energy. Finally, with this rotational movement, an alternator allows obtaining electrical energy that can be accumulated in batteries or resent to the grid.

Another objective would be finding an alternative form of cooling the industries from which the heat waste is taken. A Data Center is chosen as a reference. It detaches 150 kW of heat to the atmosphere.

Currently, electricity is mainly obtained by burning combustibles such as gas or petroleum by-products. A number of projects that are being developed in the area of thermoelectricity, ergo, projects that take heat waste and transform it into electricity. By doing this, the contamination is lower but on the other hand, the efficiency of these systems is not very high. This Project intends the production of electricity with little impact on the environment and in a more ecological form.

The final product designed in this Project cannot be obtained yet as a whole but the devices that constitute it can. For instance, the heat pump is used in residences, hotels and hospitals but also in the industry (processed that need heating water or drying tobacco, wood...

Regarding the reversed Brayton cycle, it is used in cooling systems (aircrafts, among others) and in cryogenics. Due to its structure, it is able to reach extreme temperatures. As a matter of fact, in airplanes, it is the same compressor in charge of moving the craft (with a combustion chamber and a gas turbine) and cooling the cabin as well (along with a heat exchanger and a turbine). The main difference between that system and the one that will be presented in this Project is that, here, an electrical engine is needed to make the system work.

The Stirling engine has a variety of applications too: it can work with almost any heat source. One of the most famous uses is the SunCatcher, a solar disc that takes the

energy from the sun to produce electricity with almost zero impact on the environment. It works with a solar concentrator and a unit that converts power. This unit has four cylinders filled with hydrogen that suffers an expansion when the heat from the sun reaches the unit. The gas moves along the cylinders, producing up to 1.800 rpm and a voltage of 480 V at 60 Hz.



**Figure 1: Image of the SunCatcher, made by Stirling Energy Systems**

The Stirling engine has also been used in space applications. Its simple construction and its degree of versatility make it perfect for long periods of use. In addition, it does not produce any kind of waste.

Lastly, the alternator is used in any type of application that must transform mechanical energy into electricity, thanks to the electromagnetic induction. Depending on the system it can be a synchronous machine, and asynchronous one or, as it has been chosen within this Project, an alternator used in vehicles.

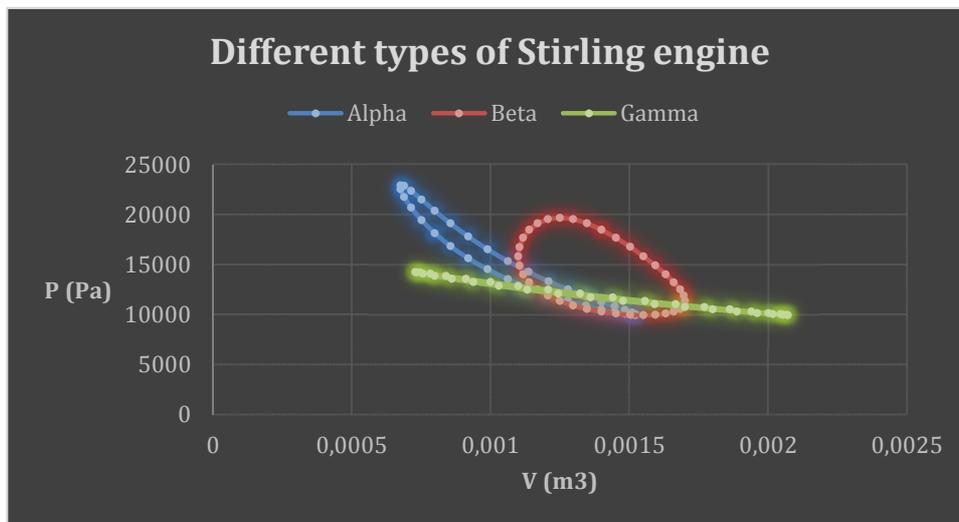
The **methodology** shows the tasks that have been performed in order to achieve the objectives previously detailed. To begin with, a study regarding the technical viability of the Project has been made –with energy evaluations and efficiency studies–. Once every possible solution had been analyzed, we worked to optimize the system: we made contact with some companies and we discussed what to do with the energy that would be obtained from the system. In the end, an estimation of the final cost to implement the system.

In the middle of the Project, a co-design session took place. In this session, professionals and experts participated and helped us solve some of the technical issues we had encountered.

As it is shown in the enlisted tasks, this Project aims developing an innovative idea of a non-existing product. This is the reason why the analysis of the technical viability had such an important role. In addition, each component of the final system was studied carefully, in order to understand how to improve their performances.

The **results** prove that the theoretical efficiency of the Stirling engine cannot be achieved in the conditions with which we work, even though it might be improved by modifying the temperatures of the hot and cold sources and the compression ratio.

In the graph shown below, there are the curves that relate the pressure inside the cylinders and the volume variation. Depending on the type of engine (alpha, beta or gamma), the work that is carried out changes. The surface inside those curves represents the stated work.



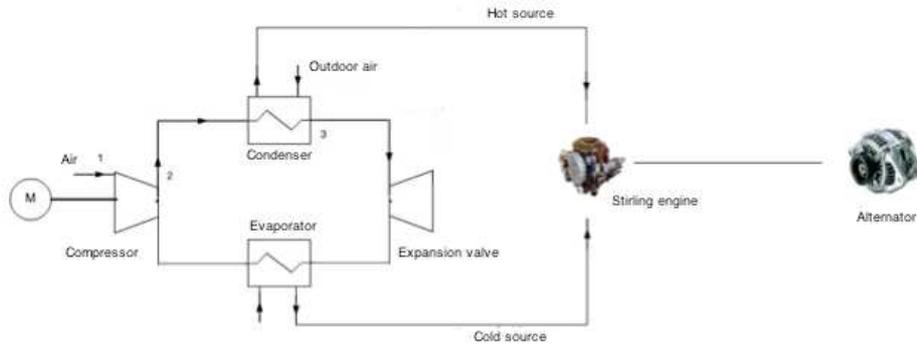
**Figure 2: Comparisson of the executed work depending on the engine type**

We made the decision of working with an alpha engine since the movement that is produced is rotational instead of linear (this would be the case of a beta or gamma engine). Besides, the productive work –difference between the work during the expansion  $W_e$  and the work of compression  $W_c$ – is the greatest of them all.

	Alpha	Beta	Gamma	
$W_e$	4,7087	2,2766	1,0019	J
$W_c$	-3,4550	-1,6705	-0,7352	J
$W_i$	1,2537	0,6061	0,2668	J
Power	20,8947	10,1024	4,4459	W

One of the solutions includes a heat pump that will become both sources of the Stirling engine (hot and cold). The required COP of the pump must be between 4 and 5

to optimize the efficiency of the system. This has been determined to make sure the temperature of both sources are 73 and 20°C.



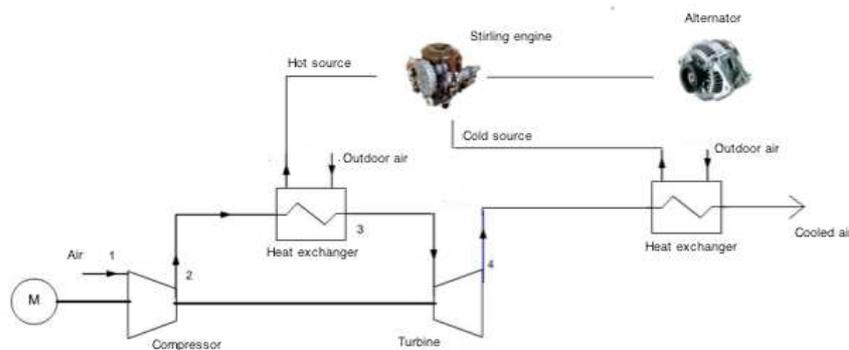
**Figure 3: Scheme of the heat pump and Stirling engine system**

In these circumstances it would be possible to obtain up to 54 kW of electricity as the output of the alternator. The consumption of the heat pump is higher in comparison with what it is produced. Nevertheless it means saving with respect to a traditional cooling system. The temperature corresponding with the cold source of the Stirling is the same temperature of the flow that is returned to the room.

The coming table sums up the consumed and generated power:

Mechanical compression	Electrical consumption	Heat generation	Electrical generation
-185 kW	-264 kW	700 kW	54,43 kW

The solution formed by the reversed Brayton cycle means a bigger economic investment, but it can achieve a greater temperature gradient.



**Figure 4: Scheme of the reversed Brayton cycle and Stirling engine**

The results of this study are:

$W_C$	$W_T$	Heat sent to the engine	W engine	$W_C + W_T$	$W_C + W_T + W_{SE}$	$W_{ELEC}$
-193,832 kW	87,218 kW	-168,424 kW	34,403 kW	-106,615 kW	-72,211 kW	58,49 kW

For both of the situations (heat pump and reversed Brayton cycle) it has been established a performance of 90% for the alternator and 90% for the multiplier.

The choice of the electrical machine has been made considering the advantages and disadvantages shown in the table below. According to the situation of the Project, we have decided to use a triphasic alternator aimed at an IVECO vehicle.

	Battery			Connection to grid		
	<i>Synchronous machine</i>	<i>Asynchronous machine</i>	<i>Alternator</i>	<i>Synchronous machine</i>	<i>Asynchronous machine</i>	<i>Alternator</i>
<b>Advantages</b>	CC Excitation always available	-	CC Excitation always available Usual functioning	Usual functioning	Usual functioning	-
<b>Disadvantages</b>	There is not a speed control system for the Stirling Addition of the rectifier	It can only work connected to the grid Addition of the rectifier	Lower power than the alternatives	Addition of a battery to have the excitation current	-	The need a battery to work properly Addition of an inverter and a transformer

By doing this, the electricity is going to be accumulated in a battery. A synchronous machine cannot be used because there is no speed control device for the Stirling engine and the asynchronous machine can only work connected to the grid when it is working as a generator.

In the **conclusions** it is presented a final balance of the study and established that, even though both of the systems chosen by FIMATEC are technically feasible but the one referred to the reversed Brayton cycle is not viable economically speaking. The compressor alone costs more than 156.000 €, while the price of the chosen heat pump is 16.070 €. Besides, all of the components of the reversed Brayton cycle would need to be obtained separately, since it is not a system that can be bought in the market.

The generation of electricity with the heat pump system remains small but it might be interesting as a method to lower the electrical consumption compared to a classic cooling system.



# ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>EFECTO TERMOELÉCTRICO .....</b>	<b>6</b>
Historia de la termoelectricidad.....	6
Proyectos de termoelectricidad.....	7
<b>COGENERACIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>OBJETO DEL PROYECTO Y MOTIVACIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>TAREAS PROPUESTAS .....</b>	<b>12</b>
<b>ESTADO DE LA CUESTIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>BOMBA DE CALOR.....</b>	<b>15</b>
<b>CICLO BRAYTON INVERSO.....</b>	<b>19</b>
<b>MOTOR STIRLING.....</b>	<b>23</b>
<b>BASES DEL PROYECTO .....</b>	<b>33</b>
<b>DIRECTRICES DEL PROYECTO .....</b>	<b>33</b>
<b>CONTEXTO DEL PROYECTO .....</b>	<b>33</b>
<b>TECNOLOGÍAS EXISTENTES.....</b>	<b>34</b>
<b>SISTEMAS PROPUESTOS.....</b>	<b>39</b>
<b>MOTOR STIRLING.....</b>	<b>39</b>
<b>BOMBA DE CALOR Y MOTOR STIRLING.....</b>	<b>41</b>
<b>CICLO DE BRAYTON INVERSO Y MOTOR STIRLING.....</b>	<b>47</b>
<b>ALTERNADOR.....</b>	<b>51</b>
<b>ESTUDIO ECONÓMICO .....</b>	<b>61</b>
<b>CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....</b>	<b>65</b>
<b>FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO 1: Acta de la reunión <i>co-design</i>.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO 2: Diagrama de Gantt .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO 3: Estudio teórico del motor Stirling.....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO 5: Comparativa climatizadores de diversas potencias y fabricantes .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO 6: Estimación COP bomba de calor para balance eléctrico nulo.....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO 7: Ficha técnica bomba de calor aire – agua Hitachi Yutaki S80.....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO 8: Aplicación numérica ciclo Brayton inverso.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO 9: Coste de inversión respecto al caudal compresor ciclo Brayton inverso. ....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO 10: Lista de fabricantes bomba de calor y alternador trifásico .....</b>	<b>98</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema cogeneración .....	9
Figura 2: Grupo electrógeno.....	10
Figura 3: Esquema simplificado bomba de calor .....	15
Figura 4: Diagrama p-h R134a con ejemplo aplicado.....	17
Figura 5: Esquemas ciclo Rankine y ciclo Brayton abierto .....	19
Figura 6: Sistema aplicado al Airbus 360 .....	20
Figura 7: Sistema Brayton Inverso .....	20
Figura 8: Esquema climatización aeronave.....	21
Figura 9: ciclo termodinámico motor Stirling.....	23
Figura 10: Diagrama PV del ciclo de Stirling .....	24
Figura 11: Esquema de un motor Stirling de tipo alfa .....	26
Figura 12: Esquema de un motor Stirling de tipo beta.....	26
Figura 13: Esquema de un motor Stirling tipo gamma .....	27
Figura 14: Esquema motor Stirling ST05G.....	29
Figura 15: Fotografía motor Stirling ST05G.....	29
Figura 16: Imagen del SunCatcher, fabricado por Stirling Energy Systems.....	30
Figura 17: Unidad de conversión de potencia .....	31
Figura 18: Imagen del motor Stirling fabricado por VIESSMANN .....	32
Figura 19: Modelización diferentes temperaturas de un Data Center .....	33
Figura 20: Climatización <i>hot aisle/cold aisle</i> .....	35
Figura 21: Climatización por disposición en armario .....	35
Figura 22: Ventilación por falso suelo .....	36
Figura 23: Ventilación por el techo - <i>hot aisle/cold aisle</i> .....	37
Figura 24: Ventilación por el techo - Disposición en armario .....	37
Figura 25: Ventilación a baja velocidad.....	38

Figura 26: Comparativa tipos de motor Stirling.....	40
Figura 27: Sistema que acopla bomba de calor y motor Stirling .....	41
Figura 28: Bomba de calor Yutaki S80 .....	46
Figura 29: Sistema del ciclo de Brayton inverso con motor Stirling .....	47
Figura 30: Circuito de rectificación doble.....	51
Figura 31: Circuito equivalente máquina síncrona.....	52
Figura 32: Circuito equivalente fase-neutro máquina de inducción.....	53
Figura 34: Componentes del alternador .....	55
Figura 35: Velocidad de rotación alternador según intensidad y la potencia.....	56
Figura 36: Funcionamiento del alternador cuando se arranca.....	58
Figura 37: Circuito de inversión de DC a AC .....	58
Figura 38: Relación coste inversión y caudal para compresores de tornillo lubricado .....	62
Figura 39: Diagrama de Gantt .....	79
Figura 40: Evolución del coste total (material e instalación) de un compresor de tornillo lubricado.....	96
Figura 41: Evolución del coste total (material e instalación) de un compresor de tornillo no lubricado.....	96
Figura 42: Evolución del coste total de un compresor de pistón lubricado .....	97
Figura 43: Evolución del coste total de un compresor de pistón no lubricado .....	97

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estrategias ventilación Data Center .....	38
Tabla 2: Datos estudio teórico motor Stirling .....	39
Tabla 3: Balance de trabajos y potencias según el tipo de motor.....	40
Tabla 4: Resumen cálculo potencias sistema bomba de calor y motor Stirling .....	45
Tabla 5: Resultados estudio ciclo Brayton .....	49
Tabla 6: Precios de motor Stirling para venta al por menor.....	63
Tabla 7: Resumen ventajas y desventajas uso batería frente a conexión a red .....	66
Tabla 8: Ficha de actuación frente a las problemáticas planteadas en el co-design.....	76
Tabla 10: Cálculos motor tipo alfa .....	83
Tabla 11: Cálculos motor tipo beta .....	85
Tabla 12: Cálculos motor tipo gamma .....	87
Tabla 13: Comparativa de bombas de calor según fabricantes y potencias .....	89
Tabla 14: Estimación COP bomba de calor para balance eléctrico nulo .....	90

# INTRODUCCIÓN

Actualmente, una cantidad superior al 75% de la energía mundial se desperdicia en forma de calor. Si ese calor fuese transformado en electricidad, se podrían evitar el 3% de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Pese a no aparentar una cuantía importante, se trata de un 1% más de lo que representa el tráfico aéreo en términos de dichas emisiones. En el caso de España en el año 2015, esa reducción equivaldría a 174 kg de CO<sub>2</sub> per cápita.

"Para generar 1 vatio de energía se requieren aproximadamente 3 vatios de calor de entrada, y ello implica descargar en el entorno el equivalente aproximado de 2 vatios de energía en forma de calor", expone Arun Majumdar, profesor de Ingeniería Mecánica de la Universidad de California en Berkeley.

El sector secundario es hoy en día el principal consumidor de energía, con alrededor de un tercio del gasto total. Muchas de las industrias que lo componen devuelven calor al entorno que, por lo general, queda sin explotar. Este calor es lo que se conoce como calor fatal y constituye una fuente de energía renovable que podría utilizarse si se dispone de un sistema apropiado. Al contrario que las energías renovables como la eólica o la solar fotovoltaica (en las cuales la producción no es constante y depende de muchos factores), esta fuente que ofrece el calor presenta un potencial mucho más regular. Por esto, pueden ser planteadas muchas utilidades, entre las que destacan la generación de electricidad y la calefacción.

Para responder a esta problemática de pérdida de calor por parte de las industrias, la empresa FIMATEC Ingénierie decidió lanzar un proyecto de innovación en colaboración con la universidad. El objetivo de éste era encontrar nuevas soluciones no disponibles en el mercado actual.

Sin embargo, existe otra problemática derivada: la temperatura de salida de casi cualquier máquina o dispositivo en nuestra vida –ya sea un vehículo o un ordenador– no es lo suficientemente elevada como para utilizarla de forma eficaz en los motores tradicionales que se alimentan de calor. Por este motivo, en este proyecto se estudia el utilizar una bomba de calor o el ciclo de Brayton inverso para aumentar esa temperatura y seguidamente, a través de un motor Stirling y una máquina eléctrica funcionando como generador, conseguir energía eléctrica. Por otra parte, con cualquiera de estos sistemas citados (y las combinaciones que ofrecen), se pretende refrigerar una sala tipo Centro de Procesado de Datos –además de producir electricidad– con un consumo energético relativamente bajo.

En realidad, la relación y el estudio de los fenómenos entre los que intervienen el calor y la electricidad se remonta al siglo XIX. Es lo que se conoce como termoelectricidad o efecto termoeléctrico.

# EFFECTO TERMOELÉCTRICO

## Historia de la termoelectricidad

La Termoelectricidad, como su nombre indica, es el estudio de los fenómenos en el que se relacionan calor y electricidad. Esta interacción entre un fenómeno eléctrico y otro térmico se conoce cuando el físico inglés James Prescott Joule fue capaz de observar que la materia ofrecería cierta resistencia al movimiento de los electrones, los cuales ceden calor al ambiente como consecuencia de su energía cinética.

En 1821, el físico alemán Thomas Seebeck descubrió que, cuando dos metales distintos se ponen en contacto y se crea un gradiente de temperatura entre ellos, se genera una diferencia de potencial en la unión de dichos metales. Es lo que da nombre al efecto Seebeck, base del funcionamiento de los termopares.

Más tarde, en 1834, el francés Jean Peltier descubrió el efecto inverso: si una corriente pasa a través de una unión bimetálica, la temperatura de una parte del circuito aumenta mientras que la de la otra disminuye, y el calor es transferido de forma proporcional a la corriente inyectada.

William Thomson fue un físico y matemático británico que trabajó en la termodinámica y en la electricidad. En 1851, demostró la relación entre los efectos Seebeck y Peltier. La principal diferencia entre los efectos Seebeck y Peltier con respecto al que probó Thomson es que éste puede ser observado en un material aunque éste carezca de soldadura.

El hecho de poder convertir un flujo de calor en una corriente eléctrica permite diversas aplicaciones, entre ellas la generación eléctrica mediante la mencionada termoelectricidad. Esta energía calorífica que se disipa incluye desde las fuentes de calor residual como son los tubos de escape de automóviles, hasta las centrales nucleares y, en general, en cualquier tipo de industria. Una de las ventajas del motor Stirling es que puede funcionar con distintas fuentes de calor. Entre ellas se encuentran las ya mencionadas nuclear y el calor de combustión pero también la energía solar.

Esta tecnología proporciona una mejora en el rendimiento energético de los sistemas anteriores, pues aprovecha mejor la energía. En el caso de los automóviles, dicha utilización del calor permitiría suplir de forma parcial el trabajo del alternador, lo cual reduciría hasta en un 10% el consumo de combustible.

Del mismo modo, como los sistemas termoeléctricos carecen de partes móviles y son por tanto más fiables y duraderos, incluso se han empleado en sondas espaciales. Un claro ejemplo se aprecia en la segunda sonda del programa Voyager, lanzada en 1977. En ella, el flujo de calor establecido entre el  $\text{PuO}_2$  y el exterior atraviesa un termopar de silicio y Germanio permitiendo así la alimentación eléctrica, dada la imposibilidad de usar paneles

solares más allá de Marte. La razón por la que se emplea el  $\text{PuO}_2$  es por su naturaleza radiactiva que hace que se desintegre, constituyendo una fuente de calor.

Pero por lo general, los sistemas que utilizan el efecto termoeléctrico tienen un rendimiento pequeño. Hay muchos centros de investigación que se dedican a la mejora de los sistemas existentes o a la búsqueda de nuevos.

## Proyectos de termoelectricidad

Existen proyectos como el de la Universidad de Duisburg/Essex. En éste se estudia la termoelectricidad empleando células de silicio. Una de las caras de las células debe estar caliente y la otra fría. Según Gabi Schierning, encargada del proyecto: “El problema hasta ahora era que la eficiencia de los materiales anteriores era relativamente baja. Y ahí es donde entra la nanoestructura: por medio de la llamada nanoestructuración de los materiales termoeléctricos, se puede aumentar significativamente la eficiencia.”

Asimismo, en Minnesota se desarrolló una nueva aleación que hace posible convertir el calor directamente en electricidad. Se trata de un compuesto multiferroico de níquel, cobalto, manganeso y estaño ( $\text{Ni}_{45}\text{Co}_5\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{10}$ ). Al colocar la aleación calentada junto a un imán permanente, la fuerza magnética del compuesto aumenta, generando corriente eléctrica en una bobina.

En la Universidad Berkeley en California (UCB) se ha estudiado por primera vez el efecto Seebeck medido en una molécula orgánica, pues los generadores termoeléctricos más conocidos operan con aleaciones metálicas caras y exóticas, lo que los convierte en demasiados costosos y poco prácticos para extender su uso.

Más actuales son los ensayos que tienen lugar en la Universidad de Colorado a manos del equipo que constituyen Mahmoud Hussein y Bruce Davis. La nueva tecnología se basa en construir un conjunto de columnas nanométricas encima de una lámina de material termoeléctrico. El problema planteado es el siguiente: cuando una diferencia de temperatura existente crea una diferencia de tensión, la temperatura comienza a disminuir, anulando la corriente que provocaba. Hussein y Davis han probado que se podría usar la nanotecnología para decelerar la transferencia de calor sin afectar el movimiento de los electrones. Se estima que sería viable reducir el flujo de calor como mínimo a la mitad.

Otro proyecto similar y en proceso es el Energy Harvesting, que permite recuperar parte del calor industrial emitido a la atmósfera. La energía eléctrica obtenida se emplea en el mismo lugar del cual se libera el calor (reduciendo su consumo eléctrico y las emisiones de dióxido de carbono). La empresa responsable es Alternative Energy Innovations, AEInnova y su tecnología se encuentra en proceso de patente. Hoy en día cuentan con dos prototipos que generan 100 W con una temperatura de los gases de  $220^\circ\text{C}$ .

Los avances en este tipo de tecnología muestran una manera distinta de plantear la producción de energía. La preocupación por el uso excesivo de combustibles fósiles y su

consecuente efecto en el medio ambiente promueven la búsqueda de alternativas. Con el paso de tiempo, tanto particulares como empresas empiezan a ser conscientes de la importancia de reducir la huella de carbono. A través de la recuperación del calor disipado, que de otra forma se perdería, será posible aumentar el rendimiento de prácticamente cualquier proceso que precise energía eléctrica, pues podrá ser reutilizada por el mismo sistema que evacúa la energía calorífica.

Pero todos los proyectos anteriores y, en general, los sistemas que utilizan el efecto termoeléctrico tienen un rendimiento pequeño. Un método muy extendido actualmente en la industria mundial es la cogeneración. A través de esta técnica es posible obtener energía eléctrica y energía térmica simultáneamente. El principio de la cogeneración es recuperar el calor para un mejor aprovechamiento de la energía.

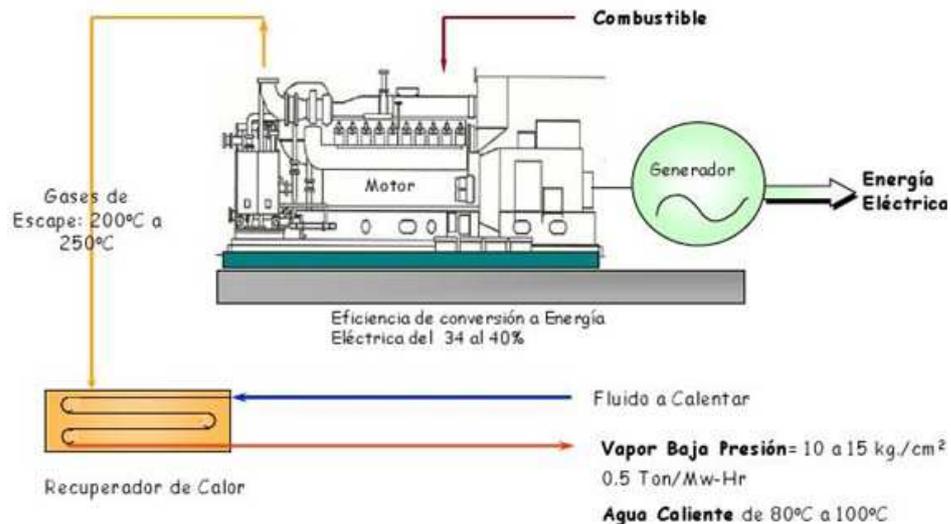
## **COGENERACIÓN**

El método que predomina hoy en día en la generación de electricidad implica quemar combustibles fósiles (como son el gas o derivados del petróleo) para producir calor y calentar aire. Este aire se hace pasar por una turbina a muy alta presión que, al girar, acciona un generador productor de electricidad. Por otro lado los gases generados al quemar el combustible salen a muy alta temperatura. En lugar de desaprovecharlos, en la cogeneración se hacen pasar por un sistema de recuperación de calor. En este caso, es una caldera en la que hay agua. Al hacer pasar los tubos calientes con los gases de combustión se genera vapor de agua. Aquí, la generación de vapor es un hecho secundario pero permite recuperar un calor que, de otra forma, sería desperdiciado.

La cogeneración llevarse a cabo tanto en los ciclos Brayton como en los combinados. Por lo tanto pueden encontrarse con turbinas de gas o de vapor, así como con pilas a combustible, ciclos de cabeza o de cola o motores alternativos (gas natural o gasóleo).

Se trata de un sistema con una eficiencia energética muy elevada, pues se obtienen de manera simultánea energías eléctrica y térmica. La ventaja de esta tecnología es la alta eficacia: cuando la electricidad es producida por un alternador impulsado por una turbina la eficacia está en torno al 30%; no obstante aplicando la cogeneración ese porcentaje puede ascender a un 70%.

Si además se utilizan los gases de escape de la combustión (200 a 250°C en el esquema anterior) para producir frío (hielo, aire frío...) se habla de trigeneración.



**Figura 1: Sistema cogeneración**

La cogeneración es un proceso contaminante pues, al tratarse de una combustión de gas o de algún derivado del petróleo, se emite dióxido de carbono a la atmósfera. Aun así, dada su alta eficacia, el consumo de combustible es menor por kWh producido.

Una de las diferencias con el motor Stirling es que éste es un motor de combustión externa (lo que indica que la energía se encuentra al exterior del cilindro). En realidad, puede emplearse cualquier fuente de calor para hacerlo funcionar, aunque no se trate de una combustión. Los motores de combustión interna que se usan en la cogeneración transforman la energía química del combustible en energía mecánica y térmica. El principio está basado en conseguir el movimiento de giro en un eje a través de los álabes de una turbina. En el caso del motor Stirling, la energía calorífica se transforma en energía mecánica. Después, en la cogeneración, la energía térmica se consigue con los gases de escape y agua caliente en la caldera. En ambas situaciones, la energía eléctrica se consigue al acoplar un alternador al eje del motor.

La idea de este Proyecto es más cercana a un grupo electrógeno que a un sistema de cogeneración. Al fin y al cabo, el grupo electrógeno no es más que un conjunto de máquinas rotativas, eléctricas y de combustión que transforman energía térmica en energía eléctrica, pasando por la mecánica intermedia.



**Figura 2: Grupo electrógeno**

Tanto un sistema con un motor Stirling como uno con un grupo electrógeno apuntan a un suministro de energía eléctrica de forma autónoma a consumidores que no estén conectados a la red eléctrica. Esto puede deberse a un fallo del sistema o a que se encuentren aislados geográficamente. La diferencia es que, al tratarse el combustible de gasolina o diésel, la combustión en el grupo electrógeno es interna (en el motor Stirling es externa). En el caso en el que haya que garantizar una continuidad del suministro –procesos informatizados automatizados, centrales y subestaciones, aeropuertos y hospitales...– es preferible el grupo electrógeno al motor Stirling a no ser que haya una fuente de calor constante y fiable.

En cualquier caso, comparado con estas dos alternativas (la cogeneración y los grupos electrógenos), el motor Stirling ofrece una tecnología de generación de electricidad más ecológica y de menos impacto en el medio ambiente.

# OBJETO DEL PROYECTO Y MOTIVACIÓN

El objetivo principal de este Proyecto de Fin de Grado es realizar un estudio del cual se obtenga un sistema capaz de aprovechar el calor que disipan las industrias y de transformarlo en energía eléctrica. Otro de los objetivos del Proyecto es proponer una solución de climatización para dichas industrias cuyo calor a disipar va a ser el que mueva el sistema. Así, con esta concepción, la energía calorífica que normalmente se pierde podrá ser empleada para varias cosas: por una parte generación de energía eléctrica y por otra parte, dada la naturaleza del sistema, climatización. De este modo, el consumo energético será menor que con una climatización tradicional y si se genera un excedente de electricidad, éste podría incluso ser reinyectado a la red o almacenado en baterías.

En concreto, se analizará la integración del “sistema de conversión de calor en energía eléctrica” en un Centro de Procesado de Datos. Se ha tomado este tipo de negocio como referencia pues, dadas las dimensiones de algunos de estos centros y el número de servidores que albergan, el aporte de potencia que debe aportarse para climatizarlos es bastante significativo.

La motivación de FIMATEC Ingénierie (entidad colaboradora) para participar en esta línea de investigación y lanzar este proyecto de innovación es responder a esta problemática de pérdida de calor en las industrias. Su objetivo es encontrar nuevas soluciones a las que hoy en día no se tenga acceso en el mercado. Es gracias a su experiencia trabajando en la industria que han advertido esta necesidad en relación al calor disipado.

Se pretende que el sistema pueda ser instalado en las industrias actuales, sin necesidad de grandes obras que impliquen costes importantes, pues no resultaría entonces una inversión tan interesante para los clientes a los que se dirige.

El planteamiento del proyecto es el siguiente: como la temperatura a la que se encontraría el Data Center (o Centro de Procesado de Datos) sin climatizar no es tan alta como para poder utilizarla de forma eficiente, es necesario elevarla para que, al ser transmitida a un motor Stirling, el rendimiento de éste mejore. Al mismo tiempo, del mecanismo empleado para subir la temperatura de la sala se va a obtener una temperatura fría que se empleará en la climatización. De la energía mecánica que se origina en el motor, a través de un generador podrá obtenerse electricidad.

Por otro lado, la proporción de calor que se pierde a nivel mundial se refleja en grandes emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Este calor habitualmente disipado constituye una fuente de energía renovable que podría explotarse si se dispone de un sistema apropiado y conseguir una producción relativamente constante (a diferencia de la energía solar o de la eólica, cuyas fuentes son más imprevisibles). El uso excesivo de los combustibles fósiles y su efecto en el medio ambiente han hecho que muchos particulares y empresas como FIMATEC busquen alternativas para reducir la huella de carbono.

En resumen, las industrias consumen abundante electricidad y generan una cantidad importante de calor. Por lo tanto, un sistema que recupere el calor, climatice la habitación y genere electricidad, puede representar un interesante ahorro para las industrias y una reducción de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

En la memoria de este Proyecto de Fin de Grado se va a presentar una solución detallada del sistema o de los sistemas propuestos así como una lista de fabricantes de los diferentes elementos que lo constituyan. Esta lista no será exhaustiva pero va a ofrecer una selección de los productos en función de los requisitos del cliente.

De este modo, se podrá facilitar el desarrollo del sistema elegido al proporcionar unas directrices preliminares. Para ello se va a partir de las condiciones iniciales propuestas por FIMATEC (ver Bases del Proyecto) tomando, como ya se ha dicho, un Centro de Procesado de Datos como industria de referencia.

La solución final propuesta será lo suficientemente detallada como para poder evaluar su rentabilidad. Su descripción va a comprender:

- El material necesario y los componentes del sistema.
- El precio de compra de dicho material según las listas de proveedores que se incluirán en la memoria.
- Las temperaturas caliente y fría de salida de la bomba de calor o del ciclo de Brayton inverso (climatización).
- La cantidad de electricidad producida y la consumida.
- El principio de funcionamiento de cualquiera de los sistemas que vayan a describirse.

## **TAREAS PROPUESTAS**

Las tareas orientadas a la consecución de los objetivos anteriormente expuestos se dividen en tres partes fundamentales: para empezar, se ha de realizar un estudio de la viabilidad del proyecto; una vez se analicen los posibles sistemas a poner en marcha y se comprenda el funcionamiento de estos, tendrá lugar la optimización del sistema y, finalmente, el estudio económico del mismo.

Aproximadamente a la mitad del desarrollo del proyecto, tendrá lugar una sesión de *co-design*, en la que se prevé la participación de profesionales y expertos en la materia. Esta jornada va a orientarse a la solución de las problemáticas encontradas. El acta de esta reunión y su descripción detallada pueden verse en el Anexo 1, así como la lista de problemas y las soluciones propuestas.

Para trabajar la viabilidad técnica del proyecto se van a realizar un balance de la energía que se transforma durante todo el proceso, un estudio del rendimiento del conjunto y una enumeración de las posibles soluciones alternativas. También se va a llevar a cabo un estudio en profundidad de todos los elementos que compondrán el sistema –especialmente del motor Stirling– así como una lista de las empresas que los fabrican.

En la segunda fase del proyecto, la de optimización, se pretende contactar con las empresas que fabriquen los componentes de cara a un posible prototipo. Igualmente va a ser necesario encontrar la mejor posición del sistema dentro del Data Center y estudiar cómo se va a captar el aire de la sala. Por último, habrá que valorar cómo distribuir la electricidad que se obtenga del alternador al final del proceso. Además, se pretende plantear el acoplamiento de las máquinas entre sí y afinar en los parámetros (como la temperatura o la presión) que hagan que aumente el rendimiento conjunto.

El estudio económico va a permitir realizar un balance financiero y prever la amortización después de la puesta en marcha del equipo.

Como se puede ver en las distintas tareas enumeradas que se llevarán a cabo, se trata de un trabajo que, además de tener lugar en equipo, tiene por objetivo desarrollar una idea innovadora de un producto final que aún no existe en el mercado.

La duración de las tareas y su orden previsto pueden verse en el diagrama de Gantt en el Anexo 2.



# ESTADO DE LA CUESTIÓN

## BOMBA DE CALOR

### Funcionamiento

La bomba de calor es una máquina frigorífica que aporta calor tomado de un espacio frío a uno caliente, con un trabajo aportado desde el exterior. Funciona igual que en un refrigerador. Emplea los mismos líquidos refrigerantes y las mismas etapas de funcionamiento. Para hacer que una bomba de calor sea reversible hay que añadir una válvula que hace posible cambiar el sentido en el que circula el refrigerante, de manera que el evaporador se transforma en condensador y viceversa.

Cuando empezaron a usarse los fluidos refrigerantes, los más comunes eran el amoníaco y el dióxido de carbono. Ambos dieron muchos problemas: el amoníaco es tóxico y el dióxido de carbono necesita presiones extremadamente altas (entre 30 y 200 bares) para poder operar en un ciclo de refrigeración. Con el descubrimiento del diclorodifluorometano, más conocido por su marca comercial Freon 12, hizo que éste sustituyese a los anteriores como refrigerante predominante. Se trata de un fluido muy estable y no es tóxico. Las presiones que precisa están en torno a la atmosférica (si tenía lugar alguna fuga el aire no penetraba el sistema y podía recargarse sin necesidad de aplicar un vacío). El problema de emplear este fluido como refrigerante es que si que tiene lugar una fuga y el Freon llega a la capa de ozono la radiación ultravioleta hace que la molécula se rompa y libere los radicales del cloro que rompen la capa de ozono. Por este motivo se prohibió la utilización del Freon 12. Es entonces cuando se reemplaza éste por el R134a.

En este proyecto, la bomba de calor seleccionada trabaja con el R134a como fluido refrigerante. La razón de utilizar una bomba de calor es elevar la temperatura del aire de la sala tipo Data Center para proyectarlo sobre el motor Stirling y mejorar su rendimiento. El esquema simplificado del funcionamiento de la bomba de calor es el siguiente:

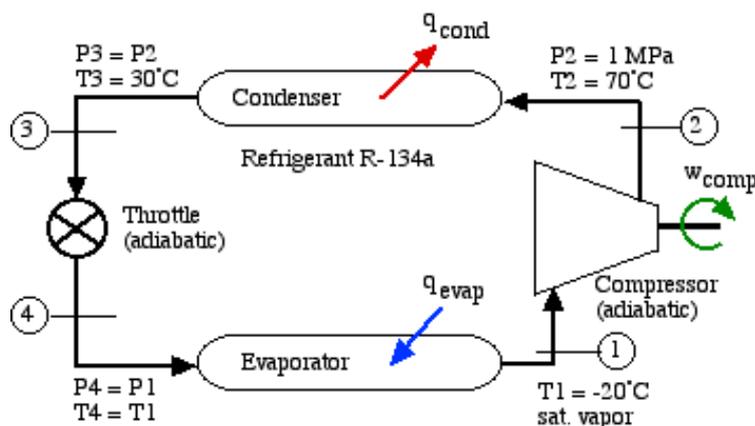


Figura 3: Esquema simplificado bomba de calor

Como se aprecia en la figura anterior, la bomba de calor está compuesta de cuatro elementos: un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador.

- 1) El compresor aspira el fluido frigorífico (en forma gaseosa) y lo comprime. La presión del fluido va a aumentar y, consecuentemente, su temperatura. A la salida del compresor, el gas alcanza una temperatura de 70°C (T2).
- 2) A continuación el gas pasa por el condensador. El condensador tiene como papel recalentar el aire de la sala gracias a la alta temperatura del fluido frigorífico y un intercambio de calor. Así, el fluido que se encontraba en estado gaseoso a la entrada del condensador, va a pasar a estado líquido. El condensador actúa como un intercambiador de calor entre el fluido y el aire ambiente. En el caso concreto de este proyecto, ese aire recalentado se usaría como fuente caliente del motor Stirling.
- 3) La válvula de expansión va entonces a disminuir la presión del fluido frigorífico – que se encuentra en estado líquido– así como su temperatura.
- 4) Tanto el fluido frigorífico como el aire de la sala pasan a continuación por el evaporador. El calor del aire se transmite al fluido, el cual se vuelve a calentar y pasa al estado gaseoso, como estaba inicialmente. En cuanto al aire ambiente, con su temperatura notablemente disminuida, se inyectará a la sala a climatizar. También podría emplearse como temperatura fría del motor Stirling, pero no es algo que se encuentre incluido en los objetivos del proyecto.

Para el análisis termodinámico del funcionamiento de una bomba de calor, cada uno de sus elementos puede ser estudiado de forma independiente, empleando el mismo planteamiento y las mismas ecuaciones.

En cuanto al concepto rendimiento, como la bomba de calor no es una máquina que transforma energía sino que la transporta, es un término que no se utiliza. En su lugar, se emplea el coeficiente de eficiencia o COP. Éste puede ser superior a 1, a diferencia del rendimiento. También es importante el concepto de foco térmico: son sistemas ideales que son capaces de mantener su temperatura cuando intercambia cantidades finitas de energía. En el caso de la bomba de calor, el calor intercambiado entre los focos frío y caliente:

$$COP_{BC} = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_C}{Q_C - Q_F}$$

El COP máximo teórico de una bomba de calor equivale al de una máquina ideal reversible, y siempre va a ser mayor que el de una máquina real que trabaje entre los dos mismos focos. Se trata del rendimiento de Carnot:

$$COP_{BC} = \frac{Q_C}{Q_C - Q_F} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

El COP máximo teórico, con unas condiciones de 20°C en el interior y 0°C en el exterior da un valor de 14,65.

En el esquema de la página anterior, el fluido entra y sale del condensador (puntos 2 y 3) a 1MPa. El fluido entra en el evaporador (punto 4) a -20°C y sale (1) como vapor saturado. Si se representan esos 4 puntos en el diagrama de presión – entalpía del refrigerante R124a, puede obtenerse una visualización del COP del sistema: sólo hay que comparar la diferencia de entalpía del compresor (1-2) a la diferencia del condensador (2-3). Es la relación entre calor de condensación y el trabajo de compresión definida anteriormente.

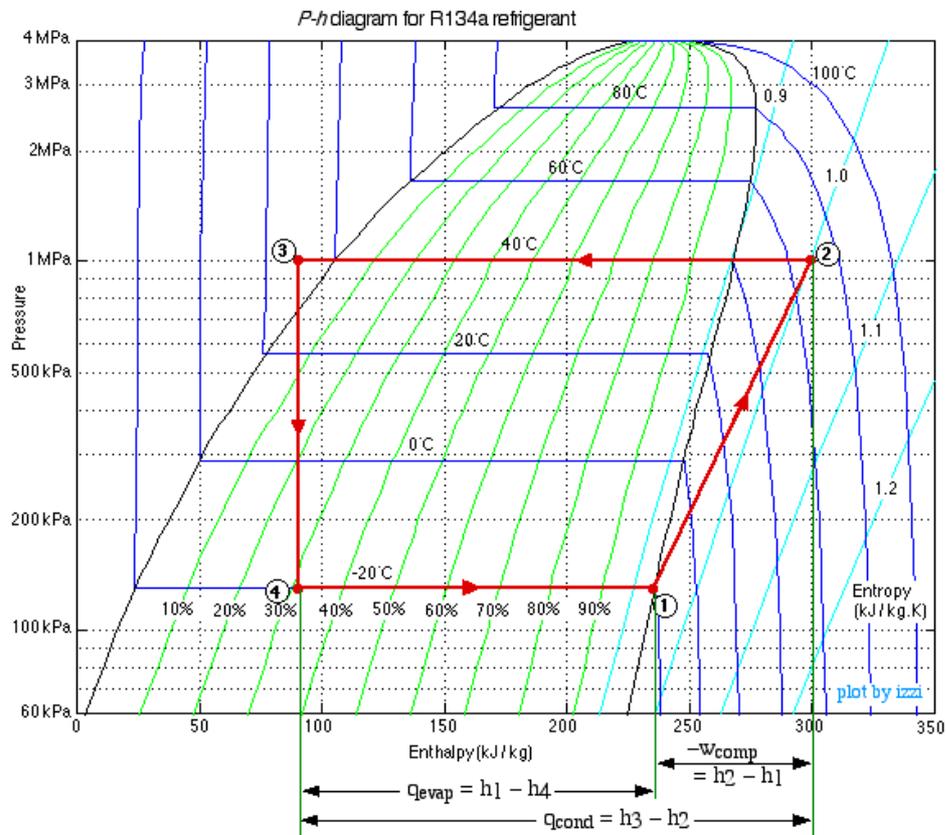


Figura 4: Diagrama p-h R134a con ejemplo aplicado

Se puede prever que, para que nuestro sistema bomba de calor y motor Stirling sea rentable, el COP de la primera debería de encontrarse entre 4 y 5. La viabilidad de cada sistema se evalúa comparando los precios de los kW eléctricos y térmicos en cada momento.

Hay que tener en cuenta que, para aumentar el rendimiento del sistema, es conveniente instalar ventiladores a la entrada del condensador y del evaporador que creen una depresión y mejoren la circulación de aire.

## Tipos de bombas de calor

Existen cuatro tipos de bombas de calor, clasificadas según la fuente de la que proviene el calor y a la que se lo ceden.

**Aire – aire:** Son asequibles económicamente hablando y muy extendidas.

**Aire – agua:** Precisan una temperatura baja para funcionar. Son típicas en las instalaciones de suelo radiante.

<b>Agua – aire</b>	}	Su COP es superior a las que toman el calor del aire dado que la temperatura de las corrientes subterráneas se mantiene, por lo general, constante.
<b>Agua – agua</b>		

## Aplicaciones actuales

Dada la configuración de la bomba de calor, similar a los sistemas de refrigeración convencionales (ambos trabajan con un compresor, un condensador y un evaporador) y puesto que con una simple válvula que cambia el sentido de circulación del líquido refrigerante el sistema se vuelve reversible, las bombas de calor actuales cubren las necesidades de calefacción y climatización.

Principalmente, la bomba de calor se emplea en el campo del confort (climatización), lo que hace que su uso destaque en el sector doméstico y en el terciario. En resumen, residencias además de hoteles y hospitales. También es corriente encontrar bombas de calor en la climatización de piscinas y en la producción de agua caliente sanitaria.

Respecto al sector industrial, las bombas de calor se emplean en procesos con fuentes de calor residual, como es el caso de este estudio. Algunas de las aplicaciones en la industria se enumeran a continuación:

- Calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, de forma análoga al sector doméstico y terciario.
- Calentamiento de agua: por ejemplo en aplicaciones industriales que cubren servicios de lavandería o limpieza.
- Procesos de secado: aplicaciones en el secado de tabaco, embutidos, madera...

Al contactar con empresas como VIESSMANN y De Dietrich, han expuesto que no fabrican bombas de calor con una temperatura de salida del agua superior a 65°C. Pero para que nuestro motor Stirling funcione correctamente, es necesaria una temperatura de 73°C como mínimo.

## CICLO BRAYTON INVERSO

Antes de definir el ciclo de Brayton Inverso se van a introducir otros conceptos.

En las Centrales Térmicas, se siguen típicamente los ciclos Rankine y Brayton. En el primero se trabaja generalmente con vapor de agua y en el segundo con un gas como el aire. En la figura que se muestra a continuación se aprecia que el ciclo de Rankine es de combustión externa y el de Brayton abierto, aunque no es un *ciclo* termodinámicamente hablando, es de combustión interna. También existe el ciclo de Brayton cerrado, pero el abierto es el más utilizado en la actualidad y, además, se asemeja más al Brayton inverso del que se hablará más adelante.

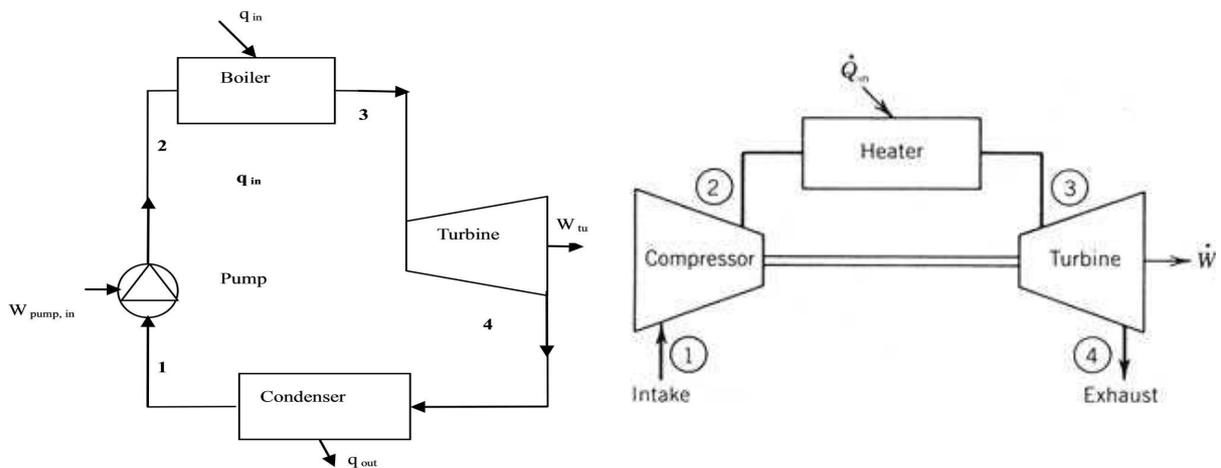
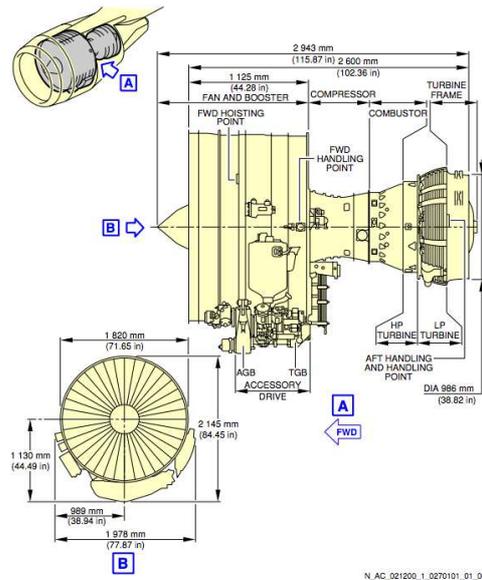


Figura 5: Esquemas ciclo Rankine y ciclo Brayton abierto

En el ciclo de Rankine es muy utilizado en las centrales térmicas de producción de energía eléctrica, ya sea a partir de combustibles fósiles o a partir de energías renovables o nuclear. Suele ser recorrido por agua –aunque a veces se emplea un refrigerante como fluido de trabajo para optimizar el uso de los focos térmicos de baja temperatura–. El ciclo funciona a través de una expansión del vapor de agua en la turbina adiabática, una condensación, compresión del líquido saturado por una bomba adiabática y una evaporación en la caldera o generador de vapor.

El ciclo Brayton presenta también aplicaciones en generación eléctrica y cogeneración pero puede usarse igualmente para el transporte, sobre todo en la aviación o propulsión marina.

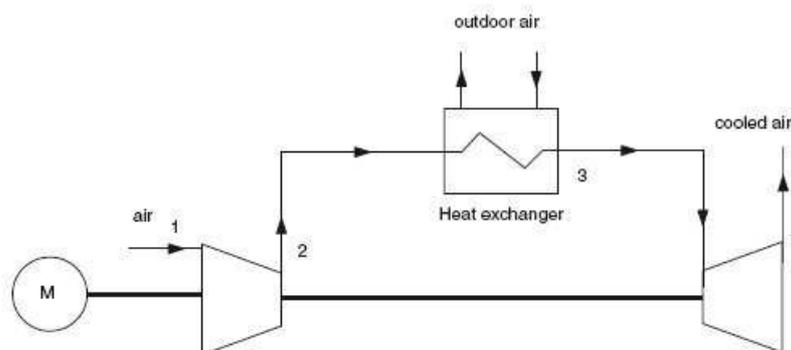


**Figura 6: Sistema aplicado al Airbus 360**

El ciclo Brayton es mucho más compacto que el Rankine dado que no necesita un condensador. Además, se necesitan temperaturas más elevadas a la entrada de la turbina para que se puedan obtener rendimientos razonables. El trabajo que consume el compresor del ciclo Brayton es muy grande pues se realiza en fase gaseosa en lugar de en fase líquida.

## Funcionamiento

El ciclo Brayton clásico (el de la figura anterior) realiza la cesión de calor expulsándolo al ambiente, sin intercambiador de calor. Esto es así porque el aporte se realiza mediante una cámara de combustión, en la cual el aire reacciona con un combustible que se inyecta a la misma presión. Esta idea, pero a la inversa, es precisamente la que hace que el ciclo de Brayton inverso sea interesante. Este sistema que invierte el procedimiento, se aplica hoy en día cuando se requieren temperaturas muy bajas, como en algunas aplicaciones espaciales y en procesos de criogenización.



**Figura 7: Sistema Brayton Inverso**

Como se aprecia en la figura anterior, el compresor, único elemento que consume energía eléctrica, actúa gracias a un motor. La compresión del aire de la sala va a derivar en un aumento de su presión y temperatura. Más adelante es refrigerado gracias a un intercambiador de calor, al contrario que en el Brayton clásico, en el que se subía la temperatura gracias a una cámara de combustión. Al llegar a la turbina, el aire se expande hasta presión atmosférica, lo que conlleva una importante caída de la temperatura. Por ejemplo, con una temperatura de entrada del aire de 40°C, el ciclo podría expulsar el aire en el punto 4 a -3°C. El propósito de este sistema, más que la generación de trabajo, es producir un movimiento de la energía calorífica: una idea similar a la bomba de calor descrita previamente.

De cara a este proyecto, este sistema es interesante pues, con las condiciones anteriormente citadas, se dispone de una fuente de calor para el motor Stirling de elevada temperatura (alrededor de 140°C en el punto 2, a la salida del compresor) y una fuente de frío (alrededor de -3°C a la salida de la turbina). Esta temperatura T4 también estará destinada a la climatización de la sala donde se instale el sistema.

### Aplicaciones actuales

En los aviones se usa un sistema para climatizar que obtiene el aire del motor. Este aire está presurizado y como consecuencia a alta temperatura. Por lo tanto, se enfría con un intercambiador de calor con el aire exterior, y puede regularse para adquirir la temperatura deseada. Después, el aire pasa por una turbina y después a la cabina. Es decir, que para la climatización de las aeronaves se emplea el mismo compresor que para conseguir el empuje con los motores del avión y le sangran entre el 10 y el 20% de aire comprimido para la presurización, neumática, etc. La diferencia principal con el ciclo de Brayton inverso que se describe en esta memoria, es que en las aeronaves el compresor recibe el trabajo de la turbina de gas y en el sistema que se va a diseñar en este proyecto sería imprescindible adjuntar un motor eléctrico que alimente al compresor.

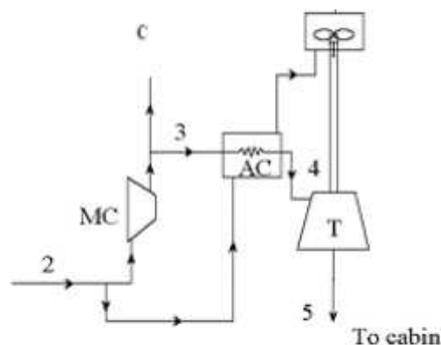


Figura 8: Esquema climatización aeronave

En el avión, la climatización es importante para mantener las temperaturas de la cabina a niveles confortables. Aunque la temperatura del exterior sea muy baja, es necesario refrigerar por cuatro motivos principales:

- Debido a los ocupantes y a los equipos, se da una importante generación de calor.
- También a causa de la fricción con el aire por el movimiento del avión.
- A cierta altitud, la presión exterior es sub-atmosférica. Cuando el aire a esta presión se comprime y se envía a la cabina a presiones cercanas a la atmosférica, su temperatura aumenta de manera significativa. Por ejemplo, el aire exterior se encuentra a 0,2 bar y a 223K (a 10.000 m de altura) y se comprime a 1 bar, su temperatura aumenta a 353K. Este efecto es conocido como Efecto ram.
- La radiación solar también influye.

La figura 8 muestra un esquema de una climatización simple de aeronave. El aire exterior a bajas presión y temperatura se comprime. En este proceso su temperatura aumenta (de 1 a 2) por el efecto *ram*. En el punto 3 el aire se ha comprimido por el compresor principal y se enfría en el intercambiador de calor con el aire exterior. Mediante la turbina se toma la entalpía de la corriente y se convierte en potencia para mover el ventilador de la figura anterior. Además, se hace caer la temperatura de 4 a 5. Este sistema es bueno para climatizar aunque la aeronave no esté en movimiento, gracias a la existencia del ventilador.

En el caso expuesto en este proyecto, se necesitarían ventiladores para mover el aire y un extractor para sacarlo por la parte superior una vez ha robado calor a los equipos.

Un Airbus A320 tiene capacidad de entre 45 y 50 m<sup>3</sup>, por lo que el sistema de presurización debe meter como mínimo ese volumen de aire y lo hace cada 2 ó 3 minutos. Además, hay que tener en cuenta la presión, la cual es mayor que la del ambiente y, por lo tanto, el volumen debe aumentar. En el centro de procesado de datos que se usa como referencia en este proyecto, suponiendo que la estancia sea de unos 3 m de alto y conociendo la superficie de 2.000 m<sup>2</sup>, el volumen de aire sería de 6.000 m<sup>3</sup>. Incluso si no hubiese que mover ese volumen cada 3 minutos, serían necesarios varios sistemas de climatización equivalentes a los de un Airbus 320.

En resumen, en los aviones, el compresor por una parte actúa junto con una cámara de combustión y una turbina de gas y, por la otra, con un intercambiador de calor y turbina.

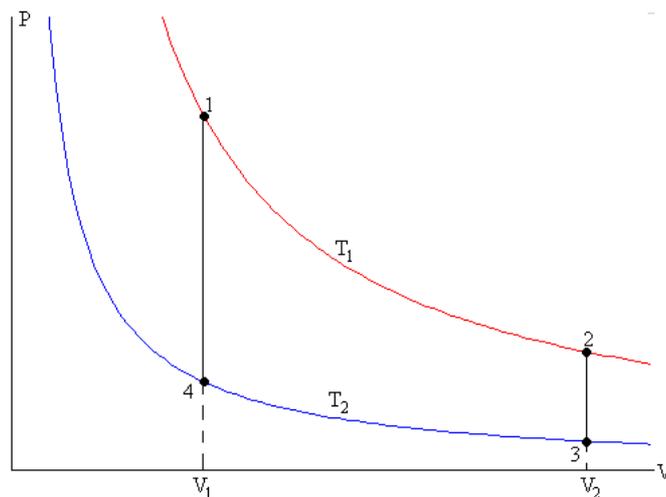
De los elementos que componen el ciclo de Brayton Inverso, el compresor tiene el consumo más importante en relación al balance. Así, el rendimiento del sistema disminuye fuertemente a medida que se aumenta la presión del punto 2. No obstante, si esta presión es demasiado baja, no será posible obtener la temperatura deseada a la salida del ciclo. De ahí el compromiso existente entre el trabajo consumido y la temperatura necesaria.

## MOTOR STIRLING

El objetivo de cualquier motor es la producción de trabajo. La mayoría de los motores modernos operan con una combustión interna que produce un movimiento concreto de pistones. Pero la combustión interna sufre de un rendimiento bastante pobre y unos sistemas mecánicos y electrónicos cada vez más complejos. Los motores Stirling, al ser de combustión externa, carecen de estos problemas. Al obligar al fluido de trabajo a permanecer dentro de los pistones a lo largo de todo el ciclo, la eficiencia energética mejora, así como la complejidad y la versatilidad.

Los motores Stirling operan con un ciclo termodinámico regenerativo, en el que el fluido de trabajo se encuentra confinado en el motor. Este fluido se modula a través de una sucesión de cambios de volumen. Los dos pistones del motor son expuestos a una fuente caliente y a otra fría, respectivamente. Así, el fluido de trabajo se comprime en el espacio frío, se transfiere al espacio caliente y se expande de manera que se produce trabajo.

Dicho ciclo es el siguiente y se desarrollará más adelante:



**Figura 9: ciclo termodinámico motor Stirling**

El motor de Stirling se diferencia de la máquina de vapor pues dispone de un regenerador. El regenerador almacena energía en cada ciclo de este modo: el calor se traslada al regenerador cuando el gas se mueve del foco caliente al frío y el regenerador aporta energía al gas cuando éste se desplaza del foco frío al caliente, aumentando su temperatura.

Lo anteriormente expuesto, aplicado a la figura 9 implica que en el proceso 2→3, el gas se traslada sin variación de volumen al foco frío, cediendo calor al regenerador y disminuyendo, a cambio su temperatura. En el proceso 4→1, el gas se traslada a volumen

constante hacia el foco caliente y recupera el calor del regenerador en el proceso. Su temperatura entonces aumenta y, al mismo tiempo, lo hace su presión y el sistema pasa del punto 4 al 1.

En definitiva, los motores Stirling muestran el mismo proceso que cualquier motor y tienen el mismo objetivo, que es la producción de energía mecánica. El fluido de trabajo es un gas que realiza expansiones y compresiones en cámaras separadas, con el consecuente cambio de volumen. En los típicos motores Stirling, una diferencia de temperatura se aplica entre los dos cilindros.

A continuación, se explica el funcionamiento detallado del motor Stirling.

## Funcionamiento

El ciclo de Stirling puede descomponerse en las cuatro etapas siguientes:

- Un calentamiento isócoro: la temperatura y la presión del gas aumentan gracias al aporte de calor de la fuente caliente.
- Una expansión adiabática: el volumen del gas aumenta y la presión disminuye. Esta etapa permite la producción de energía.
- Un enfriamiento icócoro: La presión y la temperatura del gas disminuyen. La energía se recupera por la fuente fría.
- Una compresión adiabática: la presión y la temperatura del gas aumentan. Esta es la etapa que precisa de un aporte de trabajo mecánico.

El diagrama de la presión en función del volumen es el siguiente:

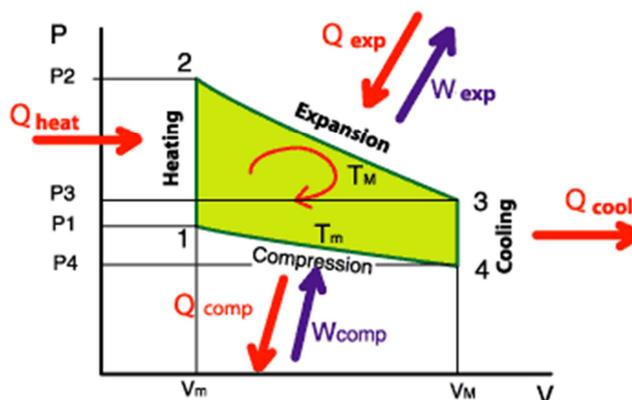


Figura 10: Diagrama PV del ciclo de Stirling

El trabajo neto recuperado puede expresarse como la diferencia entre el trabajo que produce la expansión y el que consume la compresión.

$$W_{net} = W_{exp} - W_{comp}$$

O también:

$$W_{net} = \frac{nR(T_{max} - T_{min}) \ln V_{max}}{V_{min}}$$

Y el rendimiento del ciclo se puede expresar:

$$\eta = \frac{R(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) \cdot \ln \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}}}{Cv \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) + R \cdot T_{m\acute{a}x} \cdot \ln \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}}}$$

Los rendimientos de los motores Stirling son bastante variables. Como se puede ver en la fórmula precedente, el rendimiento de estos motores está principalmente relacionado con la diferencia de temperaturas entre las fuentes caliente y fría. Realizando un estudio del rendimiento teórico con una relación de compresión de 0 a 1 y las constantes que se muestran a continuación,

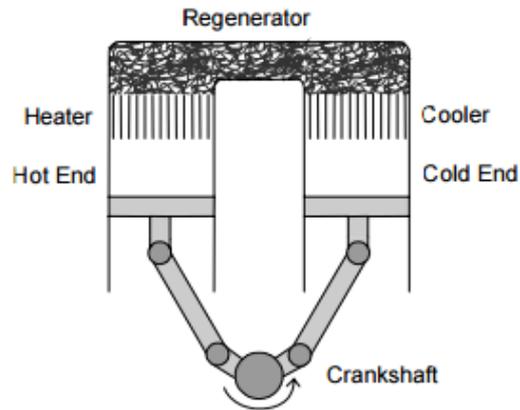
Constantes		
Temperatura fría del motor	20	293,15
Constante r	287	287
Cv aire (seco)	718	718

se obtiene un rendimiento máximo de 43% con 395°C de temperatura caliente. Ver Anexo 3 para más detalles.

## Tipos de motores Stirling

Existen tres tipos de motores Stirling:

- El motor tipo alfa: Está compuesto de un mínimo de dos pistones unidos mecánicamente y que oscilan de forma desfasada. El gas pasa a través de un refrigerador, un regenerador y un calentador. El movimiento que se genera en el eje es de rotación.



**Figura 11: Esquema de un motor Stirling de tipo alfa**

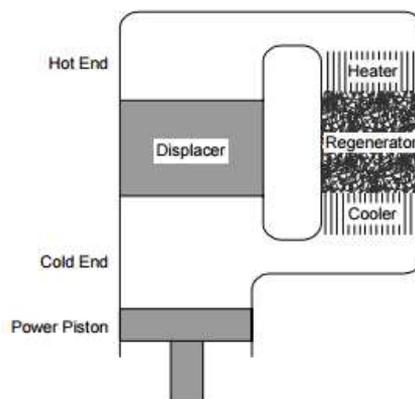
Entre sus ventajas y desventajas destacan:

Ventajas:

- Posee un rendimiento de hasta 50% (con altas temperaturas).

Inconvenientes:

- Precisa de temperaturas importantes para la puesta en marcha.
- Existen problemas de estanqueidad a alta temperatura para los pistones de potencia.
- El motor tipo beta: Utiliza un pistón que se desplaza para que el gas esté sucesivamente en contacto con la fuente caliente y la fuente fría del motor. Al igual que para el motor de tipo alfa, el gas circula a través de un refrigerador, un regenerador y un calentador. En este caso, el movimiento es de traslación.



**Figura 12: Esquema de un motor Stirling de tipo beta**

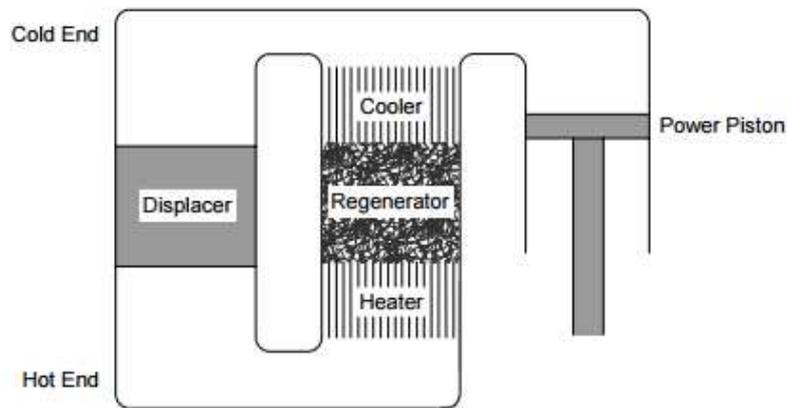
En cuanto a sus ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- Es muy compacto.
- No tiene lugar pérdida aerodinámica con la transferencia del gas de una parte a la otra del cilindro.
- Tiene un rendimiento de hasta el 50%, también con altas temperaturas.

Inconvenientes:

- Disminución de la diferencia de temperatura entre la zona cálida y la fría con la consecuente bajada de rendimiento.
- El motor tipo gamma: Este motor utiliza un pistón que se desliza y otro de potencia separados en dos cilindros diferentes. Como en el motor beta, un pistón se desliza haciendo pasar el gas de la fuente fría a la caliente. Y de la misma forma que los dos otros tipos, el gas pasa por un refrigerador, un regenerador y un calentador. Este tipo de motor se usa mayoritariamente para diferencias pequeñas de temperatura. En los motores tipo gamma, el movimiento también es de traslación.



**Figura 13: Esquema de un motor Stirling tipo gamma**

Sus ventajas e inconvenientes son:

Ventajas:

- Simplicidad de concepción.
- Puede funcionar a baja temperatura (para ciertos motores es necesaria una diferencia de temperatura de apenas 5°C).

Inconvenientes:

- Tiene un rendimiento muy débil (17%).

## **Aplicaciones**

Los primeros motores de vapor y de aire caliente no podían compensar su pérdida de calor. El añadir un regenerador permitió al motor Stirling gozar de un período de eficiencia sin competidores. Además, era mucho más seguro trabajar con él que con motores de vapor, dado que sus calderas corrían el riesgo de explotar. Pero rápidamente, los avances en los motores de vapor y más adelante la combustión interna, eclipsaron al motor Stirling en términos de practicidad y eficiencia.

Hoy, el motor Stirling ha vuelto a recobrar interés como medio para generar electricidad. El énfasis en la energía sostenible ha hecho perceptible la habilidad de este motor para convertir una gran variedad de fuentes de calor, como son la energía solar y el calor disipado, en trabajo mecánico.

Además, se trata de un sistema reversible ya que si se le aporta energía mecánica puede trabajar como una bomba de calor o como un sistema de refrigeración. Es un método muy competitivo en el mercado criogénico, al igual que el ciclo de Brayton inverso, dado que sólo precisa de energía mecánica para aportar un gradiente de temperatura.

Los motores Stirling también se han empleado en aplicaciones espaciales. Su relativamente simple construcción y su alto grado de versatilidad hacen que sean ideales para largos períodos de uso. De manera adicional, no producen ningún tipo de residuo, una ventaja evidente.

Un inconveniente de los motores Stirling es que tardan en calentarse. Por este motivo, no se prevé que vayan a sustituir a los motores de combustión en automoción. Sin embargo, para aplicaciones como son la micro-cogeneración son muy prácticos. Así, los consumidores finales de la energía podrán ser independientes del suministro eléctrico externo, si se tiene acceso al combustible que precisa la cogeneración. Esto es especialmente interesante para los núcleos de población dispersos, entre otros. Al igual que en este

proyecto, la micro-cogeneración parte de aprovechar el calor residual que disipan máquinas térmicas para, por ejemplo, generar electricidad o calentar agua.

Otras de las aplicaciones del motor Stirling se detallan acto seguido:

- ST05G, desarrollado por Dieter Viebach

Fue desarrollado en 1992 por el alemán Dieter Viebach. Fue adaptado para una parábola solar así como para un sistema de biogás. Esta polivalencia entre el sol y el biogás asegura al sistema una alimentación continua como energía renovable permanentemente.

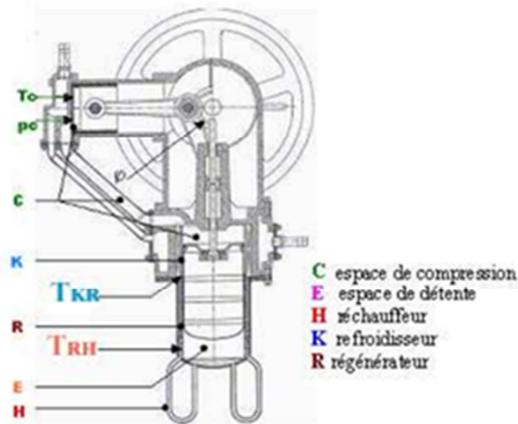


Figura 14: Esquema motor Stirling ST05G



Figura 15: Fotografía motor Stirling ST05G

Las características de este motor son:

- Motor de tipo : Gamma.
- Fluido de trabajo: aire comprimido.
- Presión máxima que soporta: 1 Mpa.
- Velocidad de rotación nominal: 600 rpm.
- Capaz de aportar una potencia mecánica al árbol de 500 W.

El motor está acoplado por una correa a una dinamo de 12 V, que a su vez permite la medida del par transmitido por la correa.

El motor ensayado es de tipo cinemático. Es decir, las dos piezas móviles son acopladas con la ayuda de un mecanismo rígido.

- El *SunCatcher*, fabricado por Stirling Energy Systems

La compañía Stirling Energy Systems (SES) trabaja con el SunCatcher, un disco solar que recibe la energía del sol para producir electricidad sin contaminación. Se trata de una empresa con sede en Arizona (EEUU) que consiguió recientemente el récord de eficiencia en la conversión de energía solar a electricidad, con un 31,25% de eficiencia neta.

Este disco tiene el nombre comercial de *SunCatcher* y fue desarrollado en Suecia en 1984. Pero en 1996, Stirling Energy Systems adquirió los derechos de patente de esta tecnología y, junto con Boeing, continuaron trabajando en la mejora del motor Stirling.



**Figura 16: Imagen del SunCatcher, fabricado por Stirling Energy Systems**

En cuanto al funcionamiento del *SunCatcher*, puede decirse que tiene lugar gracias al concentrador solar y a la unidad de conversión de potencia, situada en el brazo receptor del disco. Esta unidad consta de cuatro cilindros (con sus correspondientes pistones) donde se trabaja con hidrógeno en forma de gas de manera que éste se expande cuando el calor de los rayos solares alcanza la unidad. El resultado es que el gas se intercambia entre los cilindros, produciendo un máximo de velocidad angular de 1.800 rpm y una tensión de 480 V a 60 Hz.



**Figura 17: Unidad de conversión de potencia**

Dos de los contratos más importantes en los que SES se ha involucrado se firmaron en 2005. Uno fue con Southern California Edison (500 MW) y otro con San Diego Gas & Electric (300 MW). Cabe decir que una instalación de 500 MW puede abastecer a un cuarto de millón de hogares. Los dos procesos fueron gestionados y operados por SES.

- El motor Stirling de VIESMANN

Este motor, fabricado por VIESSMANN, permite crear calor y paralelamente crear electricidad. En realidad, un movimiento de traslación tiene lugar gracias a dos pistones que son accionados por un quemador de gas. El movimiento se transforma en electricidad y el calor residual se emplea para calefacción. Al recuperar las pérdidas del motor, el rendimiento del conjunto puede llegar a superar el 95%.

Por ejemplo, una caldera de tipo Vitotwin 300-W con un motor Stirling permitirá cubrir algo más de 20.000 kWh de consumo en gas al año y 3.000 kWh de consumo eléctrico.



**Figura 18: Imagen del motor Stirling fabricado por VIESSMANN**

Las características de este motor son:

- Potencia eléctrica. De 0,6 a 1kWe
- Potencia térmica: de 3,6 a 5,3 kWt
- Potencia total: de 3,6 a 26 kW
- Rendimiento global del motor Stirling: 96 % (PCS) / 107 % (PCI)
- Rendimiento global : 98 % (PCS) / 109 % (PCI)
- Combustible : gas natural y gas líquido.
- Fluido de trabajo: Helio.

# BASES DEL PROYECTO

## DIRECTRICES DEL PROYECTO

El estudio de este proyecto se ha basado en una sala tipo Data Center cuya modelización fue proporcionada por la empresa FIMATEC. Sus características se muestran a continuación:

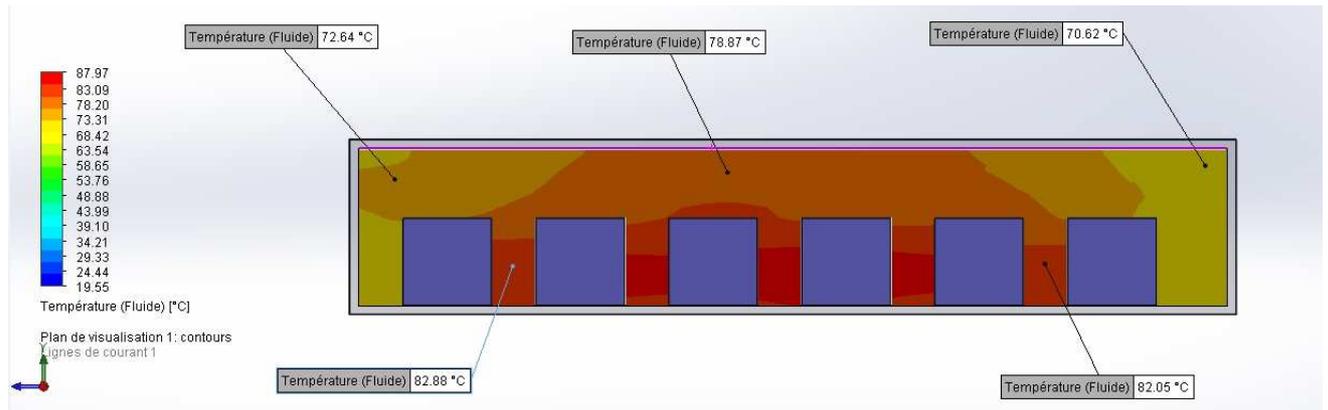


Figura 19: Modelización diferentes temperaturas de un Data Center

- Superficie de la sala:

$$S=100m \cdot 20m= 2000m^2$$

- Temperaturas: Las temperaturas varían en función de la ubicación en la sala. El objetivo es climatizar el Data Center a una temperatura comprendida entre 20 y 26°C. La regulación debe ser muy precisa ( $\pm 0,3^\circ\text{C}$ ). El aire sobre los ordenadores puede alcanzar los 35°C.
- Potencia: El Data Center está compuesto por 6 filas de HUB que desprenden 25kW cada una. Es decir, una potencia total de 150kW. En este estudio no se tienen en cuenta las pérdidas naturales.
- Humedad ambiente: La humedad relativa oscila entre un 50 y un 60% ( $\pm 5\%$ ).

## CONTEXTO DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es proponer una solución de climatización para una sala tipo Data Center con un sistema de bajo consumo energético. Los centro de procesamiento de datos (y las industrias en general) son grandes consumidores de electricidad y generan una

cantidad importante de calor. Por lo tanto, crear un mecanismo que va a recuperar el calor, climatizar la habitación y generar electricidad gracias a un sistema de motor y alternador, es un método que puede reportar un interesante ahorro económico.

No obstante, el sistema debe ser integrable en las instalaciones actuales de las industrias. No debe necesitar grandes obras de instalación, pues añadirían costes suplementarios para los clientes eventuales.

## **TECNOLOGÍAS EXISTENTES**

Un Data Center o centro de procesamiento de datos es una instalación que alberga sistemas de información y sus componentes asociados, como las telecomunicaciones y los sistemas de almacenamiento. Suele incluir fuentes de alimentación redundantes o de respaldo, controles de ambiente y otros dispositivos de seguridad.

La climatización en este tipo de industria resulta indispensable para el correcto funcionamiento de los servidores. Dicha climatización precisa una gran cantidad de electricidad dadas las importantes dimensiones de los Data Centers. La potencia frigorífica a introducir en la sala informática se debe sobre todo al calor que disipan los ordenadores. En la medida de lo posible, las salas no deben tener una apertura al exterior, no deben estar expuestas al sol ni al polvo. Los aportes de potencia son por lo general muy elevados: entre 100 y 700W por cada metro cuadrado de superficie. Además, son constantes tanto en invierno como en verano.

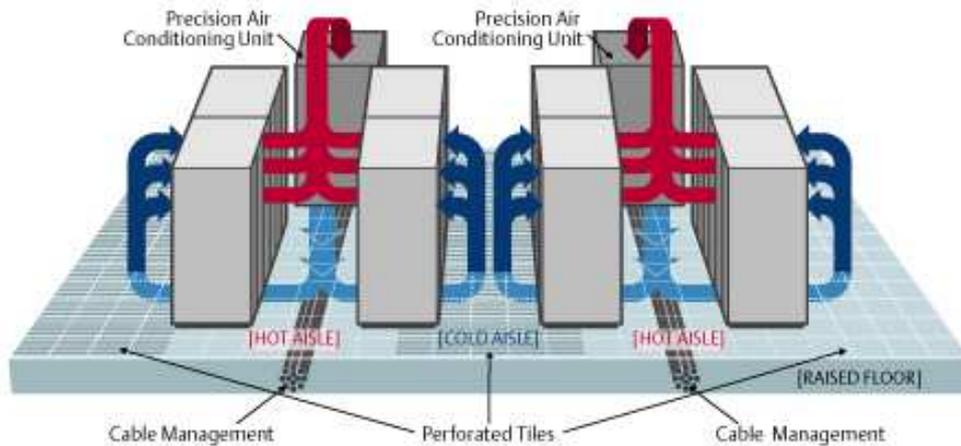
Este proyecto tiene entre sus objetivos la climatización de este tipo de salas reduciendo la cantidad de electricidad necesaria. Es más, se pretende generar un excedente de electricidad que pueda ser reinyectado a la red o almacenado en baterías.

Esta aplicación también podría ser empleada para otro tipo de industria en el que se disipe una gran cantidad de calor o incluso para particulares.

Las tecnologías más típicas que se emplean hoy en día para climatizar las salas de procesamiento de datos se muestran a continuación:

### ***– Hot aisle/cold aisle:***

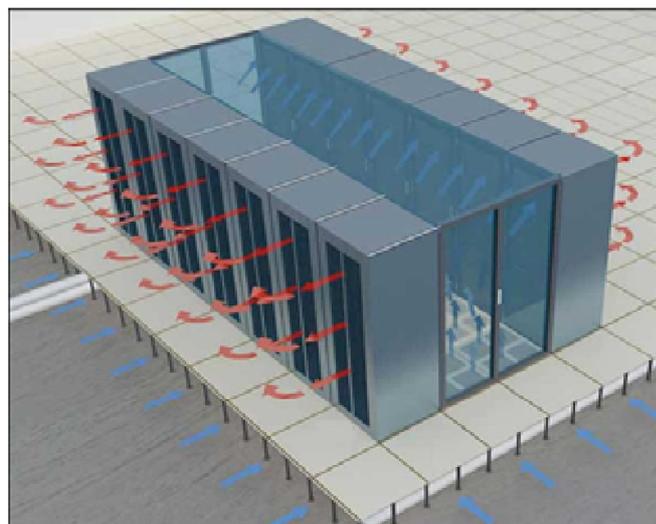
La finalidad de esta estrategia es conservar la energía y disminuir los costes de la refrigeración a base de controlar el flujo de aire. Se trata de una disposición concreta de los servidores. Estos están en estantes que se alinean de manera que, en las filas, la toma de aire frío y la toma del caliente se alternan.



**Figura 20: Climatización hot aisle/cold aisle**

Además, puede usarse un sistema de contención para aislar los pasillos calientes de los fríos, y evitar así que los flujos de aire se mezclen. Entre estos sistemas de contención se encuentran varias técnicas: elevar el suelo 1,5 pies (algo menos de medio metro) para facilitar el movimiento de aire, la instalación de puertas automáticas.

**– Disposición en armario:**



**Figura 21: Climatización por disposición en armario**

Se trata de abarcar dos líneas de estantes en el interior de un armario refrigerante y de extraer el aire caliente que sale de cada armario por la parte superior de cada sala. De esta manera se consigue una pérdida de energía minimizada.

### – Disposición clásica

Para las construcciones antiguas, se va a insuflar el aire frío por el techo y se extraerá el caliente por un conducto paralelo, también situado en el techo.

En cuanto a los sistemas de ventilación en este tipo de salas, constituyen también una parte muy importante del proceso de climatización existen varias técnicas en uso en la actualidad:

### – Ventilación a través de falso suelo

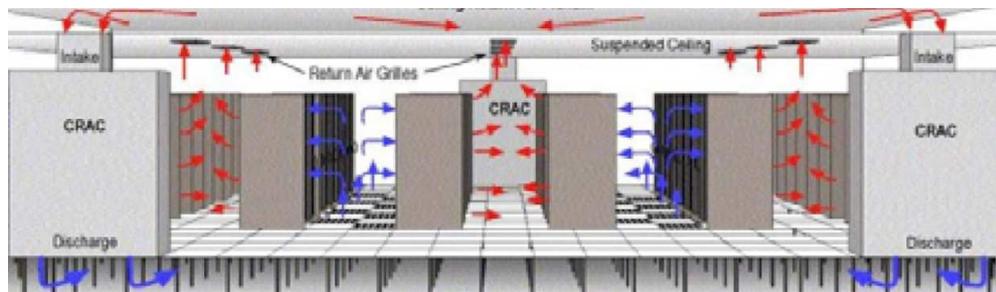
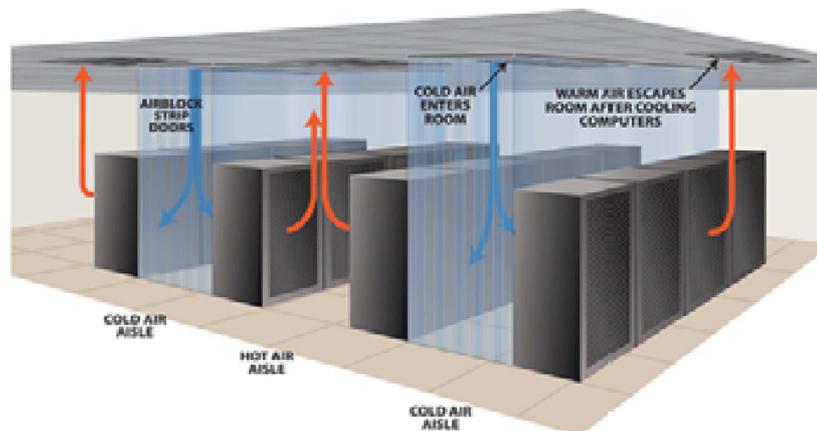


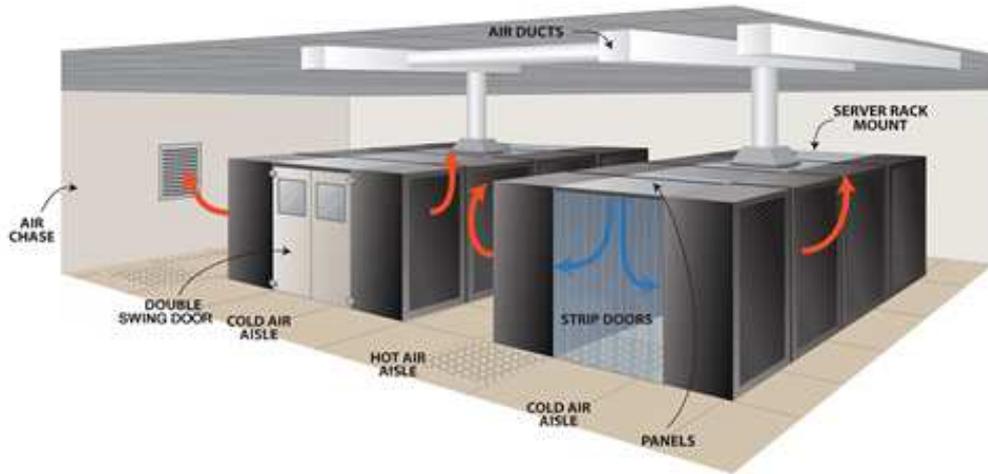
Figura 22: Ventilación por falso suelo

El aire se envía a través de *plenums* de 60 a 120cm, cajas diseñadas para inyección o retorno de aire a través de una cara en la que hay un difusor, que se encuentran bajo el suelo. El aire frío se difunde por la habitación gracias a que el suelo está perforado. A continuación, el aire caliente es aspirado por el techo y se utiliza para calentar otras salas o se enfría de nuevo. En el caso de este proyecto, no se disiparía el calor sino que se convertiría en energía eléctrica.

### – Ventilación a través del techo



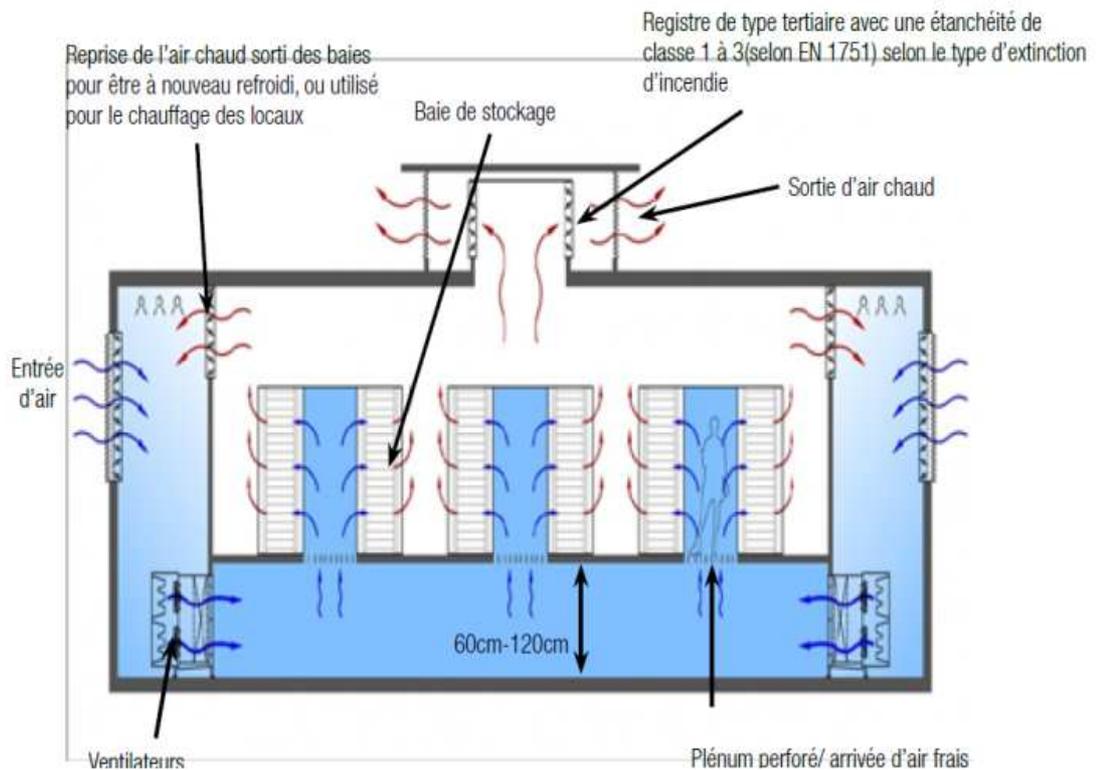
**Figura 23: Ventilación por el techo - hot aisle/cold aisle**



**Figura 24: Ventilación por el techo - Disposición en armario**

El aire frío es transmitido por el techo de la sala, y después recorre las filas de servidores colocadas en pasillos o dentro de armarios. Igual que en el tipo de ventilación anterior, el aire caliente es aspirado por el techo y se procede a volver a enfriarlo para volver a inyectarlo en la sala.

**– Método alternativo: ventilación a baja velocidad**



**Figura 25: Ventilación a baja velocidad**

Orientado a los Data Centers en proceso de construcción, pues necesita una disposición precisa. La unidad de enfriamiento se coloca bajo la sala y difunde el aire frío a muy baja velocidad a través de un *plenum*. Con este método la ventilación tiene un consumo inferior a los anteriores. El aire aspirado será o bien expulsado al exterior o bien enfriado de nuevo. Para limitar las pérdidas de carga, los registros que se usan para orientar el flujo de aire deben ser de gran tamaño.

**– Free Cooling**

Se usa el aire exterior para climatizar el Data Center. Este sistema es óptimo cuando la temperatura exterior es inferior a 13°C. Debe añadirse un sistema de ventilación que tendrá un gasto constante.

**– Rack confinado**

Por lo general se utiliza para aplicaciones móviles de Data Center. Está constituido por una entrada de aire frío por la parte superior y de un flujo descendente que es aspirado por el bajo del armario. Dicho flujo de aire pasa por los “puntos calientes” del rack donde se enfría nuevamente para volver a ser inyectado en el circuito.

En resumen, las diferentes estrategias empleadas en un Data Center:

Tipo de ventilación	Falso suelo	Techo	Baja velocidad	Free cooling	Rack confinado
<b>Eficacia</b>	Alta: según la disposición de los racks	Media: pérdida de eficacia por la mezcla del aire caliente con el frío	Muy alta: armarios refrigerados	Alta: cuando la temperatura exterior baja de los 13°C	Muy buena: localiza los puntos calientes de los vanos
<b>Coste de instalación</b>	Medio	Bajo	Alto	Muy bajo	Medio
<b>Coste de funcionamiento</b>	Medio	Alto	Bajo	Alto	Alto

**Tabla 1: Estrategias ventilación Data Center**

# SISTEMAS PROPUESTOS

Antes de presentar las posibles soluciones –bomba de calor con motor Stirling y alternador o ciclo de Brayton inverso con motor Stirling y alternador– se va a mostrar el estudio teórico que se hizo del motor Stirling.

## MOTOR STIRLING

Como se planteó anteriormente en el estado de la cuestión, el motor Stirling produce trabajo a través de la compresión y expansión de un gas gracias a un gradiente de temperatura de dos fuentes.

Su rendimiento puede variar enormemente, así como las aplicaciones a las que se orienta dependiendo del tipo de motor que se emplee en cada caso (alfa, beta o gamma). Ellos tres tienen características diferentes, entre ellas la energía mecánica que pueden llegar a transformar.

Para evaluar estas diferencias, se han supuesto los siguientes datos generales, siendo el volumen barrido el espacio que recorre el pistón en la carrera y el espacio muerto el volumen entre el extremo del cilindro y el pistón:

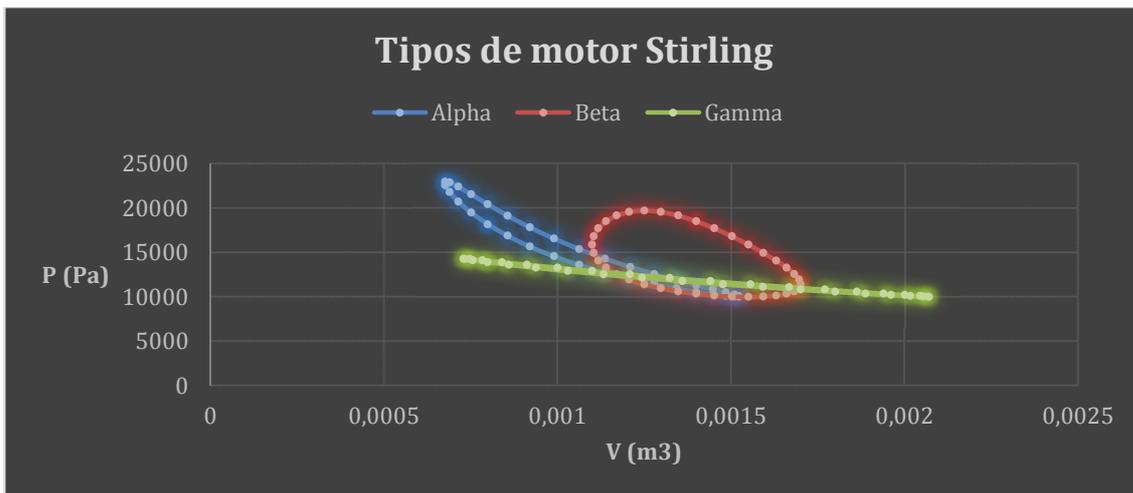
$V_{SE}$	600	$cm^3$
$V_{DE}$	100	$cm^3$
$V_{SC}$	600	$cm^3$
$V_{DC}$	100	$cm^3$
$dx$	90	deg
$V_R$	300	$cm^3$
$P_{min}$	1	bar
Velocidad de rotación	1.000	rpm
$T_C$	30	°C
$T_E$	140	°C
$T_R$	85	°C

**Tabla 2: Datos estudio teórico motor Stirling**

Donde las magnitudes de la tabla denotan:

- $V_{SE}$ : Volumen barrido pistón (expansión).
- $V_{DE}$ : Espacio muerto expansión.
- $V_{SC}$ : Volumen barrido pistón compresión (o pistón de potencia).
- $V_{DC}$ : Espacio muerto compresión.
- $dx$ : Fase angular.
- $T_C$ : Temperatura gas compresión.
- $T_E$ : Temperatura gas expansión.
- $T_R$ : Temperatura gas regenerador.

Los resultados de este estudio se reflejan en este gráfico, donde se relacionan las variaciones de presión y volumen que tienen lugar en los pistones de cada motor:



**Figura 26: Comparativa tipos de motor Stirling**

De donde se comprueba que, para los datos con los que se ha trabajado (tabla 2), los trabajos realizados (de compresión o  $W_c$  y de expansión o  $W_e$ ) para cada tipo de motor son:

	Alfa	Beta	Gamma	
$W_e$	4,7087	2,2766	1,0019	J
$W_c$	-3,4550	-1,6705	-0,7352	J
$W_i$	1,2537	0,6061	0,2668	J
Potencia	20,8947	10,1024	4,4459	W

**Tabla 3: Balance de trabajos y potencias según el tipo de motor**

Ver anexo 4 con los cálculos en profundidad.

## BOMBA DE CALOR Y MOTOR STIRLING

El primer sistema de los que se propone es acoplar una bomba de calor a un motor Stirling. Igualmente, se adjuntará un alternador al final para la producción de electricidad.

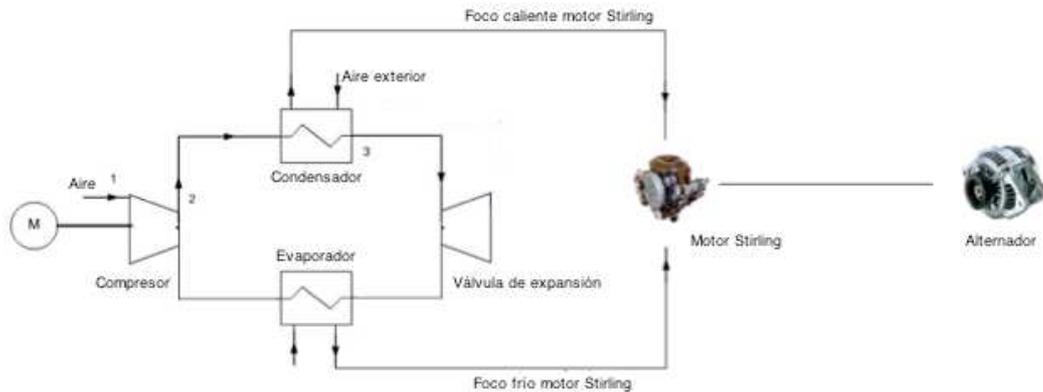


Figura 27: Sistema que acopla bomba de calor y motor Stirling

Como se aprecia en la figura anterior, el compresor es la principal causa del consumo eléctrico de la bomba de calor. El condensador intercambia calor con el aire exterior y se va a emplear como foco caliente del motor Stirling. Del mismo modo, el evaporador se empleará para tener un foco frío del motor. Al crear una diferencia de temperatura mayor, el rendimiento aumentará.

En esta parte se van a determinar las características de la bomba de calor. Para realizar este estudio se tomó la decisión de comenzar analizando el rendimiento motor. Esto permitió determinar la temperatura a la que la bomba de calor deberá funcionar.

### Estudio del rendimiento

El rendimiento real del ciclo del motor Stirling está dado por la siguiente relación:

$$\eta_{MS} = \frac{W_{net}}{Q_{aportado}}$$

Y expresando el trabajo y el calor en función de las temperatura y de las relaciones de volumen:

$$\eta_{MS} = \frac{R(T_{max} - T_{min}) \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)}{C_v(T_{max} - T_{min}) + RT_{max} \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)}$$

También existe una fórmula para expresar el rendimiento teórico, coincidente con el rendimiento de Carnot.

$$\eta_{MS} = 1 - \frac{T_{fría}}{T_{caliente}}$$

Para la continuación del estudio se ha tomado el rendimiento teórico con un factor de corrección de 0,8 para compensar con pérdidas que no se tengan en cuenta.

Por lo tanto, se empleó la fórmula del rendimiento teórico para la determinación de las temperaturas caliente y fría del motor, suponiendo su rendimiento teórico en torno al 12%. La temperatura caliente de entrada al motor debe de ser de 60°C. Entonces se puede determinar la temperatura de salida de la bomba de calor (la temperatura que va a introducir los 60°C en el motor).

Para estimar la temperatura caliente a la salida de la bomba, se puede considerar la cámara caliente del motor Stirling como un intercambiador agua/helio. En este intercambiados, se pretende que la temperatura caliente del motor sea cercada a la temperatura caliente de salida de la bomba. Se va a calcular un intercambiador que verifique esa condición.

Sea  $E_f$ :

$$E_f = \frac{T_{f, salida} - T_{f, entrada}}{T_{c, entrada} - T_{f, entrada}}$$

Sea  $E_c$ :

$$E_c = \frac{T_{c, entrada} - T_{c, salida}}{T_{c, entrada} - T_{f, entrada}}$$

La condición definida anteriormente sólo se puede verificar con la primera ecuación, la cual debe coincidir con la eficiencia del intercambiador. Para ello, se debe tener un caudal frío inferior al caliente. Para ello se debe cumplir:

$$Q_{mf} < \frac{Q_{mcaliente} \cdot C_{pcaliente}}{C_{pfrio}}$$

En este caso:

El agua es la fuente caliente.

El helio es la fuente fría.

Por lo tanto, es necesario que:

$$Q_{mHe} < \frac{Q_{mH2O} \cdot C_p H2O (a 70^{\circ}C)}{C_p HE (a 70^{\circ}C)}$$

El caudal de Helio representa la cantidad que se encuentra en la cámara del motor y se desplaza gracias al pistón.

Si se respeta esta condición, se puede decir que:

$$E_f = 0,75$$

Con estos valores es posible calcular las temperaturas necesarias:

$$T_{c,BC} = T_{f,intercambiador} + \frac{T_{c,mot} - T_{f,intercambiador}}{E_f}$$

Suponiendo una temperatura fría del intercambiador de 30°C, la temperatura necesaria a la salida de la bomba de calor es de 73°C.

## **Estudio teórico bomba de calor**

Para limitar las pérdidas y la potencia de la bomba, es deseable que la temperatura del fluido a alta presión sea cercana a dichos 73°C. Dicha condición se verifica con la siguiente ecuación:

$$Q_{mf} < \frac{Q_{mcaliente} \cdot C_{pcaliente}}{C_{pfrio}}$$

En este caso:

El fluido frigorífico es la fuente caliente.

El agua es la fuente fría.

Procediendo de la misma forma que antes, se tiene una temperatura del fluido frigorífico de 87°C tras el compresor.

Para el estudio del condensador se consideran las siguientes condiciones iniciales:

Temperatura y presión del fluido absorbido: 45°C, presión ambiente.

Potencia calorífica disponible: 150 kW.

Para climatizar a 20°C, el aire que debe ser enviado con una desviación de 5 a 10°C de la temperatura deseada. Así, se toma una temperatura de climatización de 15°C.

La bomba de calor debe absorber los 45°C y devolver 15°C.

Se desea que el máximo calor sea absorbido por el evaporador. Por lo tanto, la temperatura caliente del fluido frigorífico debe ser cercana a la temperatura captada (condición que ya se ha visto que se satisface).

En este caso:

El aire es la fuente caliente.

El fluido frigorífico es la fuente fría.

Empleando las ecuaciones de las eficiencias, se puede determinar la temperatura del fluido frigorífico. Pero antes, es preciso decidir con qué fluido se va a trabajar.

### **Estudio de una bomba de calor ideal funcionando con R134a**

El R134a es uno de los fluidos frigoríficos más utilizados. Por este motivo, el estudio de la bomba de calor de este Proyecto se ha orientado a este fluido.

Conociendo la temperatura de entrada a la bomba de calor y la del aire climatizado se puede determinar la cantidad de aire a definir para refrigerar. La potencia está relacionada con el caudal y la diferencia de temperaturas según esta ecuación:

$$Q = \dot{q}m \cdot (T_{entrada} - T_{clim})$$

El gasto másico a establecer es de 5kg/s, es decir 15.450 m<sup>3</sup>/h

De donde se deduce, con las condiciones del apartado anterior que el del R134a debe ser de 4,5 kg/s, el del agua 3,1 kg/s y el del helio 2 kg/s.

Una vez conocidos estos datos, se podrían calcular el resto de temperaturas.

## Estimación de la potencia mínima necesaria

Como se conocen las entalpías de los elementos que componen la bomba de calor, es posible deducir la potencia de compresión y la potencia calorífica creada.

En primer lugar, se va a determinar el trabajo y el calor. Estos valores se obtienen de las relaciones siguientes:

$$W_{compresion} = \frac{h(T_{c,HP}) - h(T_{c,BP})}{\eta_{comp}}$$

$$Q_{creado} = (h(T_{c,HP}) - h(T_{f,HP})) \cdot \eta_{intercambiador}$$

De donde el trabajo equivale a 41,25 kJ/kg y el calor a 158 kJ/kg

El COP de una bomba de calor con estas características se calcula a partir de esos datos, resultando en un valor de 5.

Para el balance de potencia se emplean las siguientes ecuaciones:

$$P_{mec} = W_{comp} \cdot qm_{R134a}$$

$$P_{elec,consumida} = \frac{P_{mec}}{\eta_{mot,elec}}$$

$$P_{calorifica} = qm_{R134a} \cdot Q_{creado}$$

$$P_{elec,creada} = P_{cal,creada} \cdot \eta_{MS} \cdot factor\ corrector \cdot \eta_{alt}$$

Donde el rendimiento del alternador incluye el de la relación de multiplicación

$$\eta_{alt} = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81$$

Aplicando estas fórmulas se tiene que:

Potencias sistema bomba de calor y motor Stirling			
Mecánica de compresión	Eléctrica consumida	Calorífica creada	Eléctrica creada
185 kW	264 kW	700 kW	54,43 kW

**Tabla 4: Resumen cálculo potencias sistema bomba de calor y motor Stirling**

En resumen, esta bomba de calor consume 264 kW de electricidad, en condiciones tales que el rendimiento teórico del motor Stirling acoplado a ella sea de un 12%. Se trata de una bomba de calor con el COP optimizado pues, si fuese más potente la relación de calor a la salida y potencia a la entrada sería peor, y se produciría menos potencia calorífica a su salida. Ver

Finalmente, el balance de energía eléctrica consumida está en torno a los 220 kW. El empleo de otro fluido de trabajo cambiaría las potencias y las prestaciones de la bomba. En este caso, se va a emplear el R134a porque se trata del fluido frigorífico más corriente y será más sencillo encontrar un aparato con estas características en el mercado.

Ver anexos 5 (comparativa climatizadores de diversas potencias y fabricantes) y 6 (estimación COP bomba de calor para balance eléctrico nulo) para más detalles.

Con todo esto presente, se ha escogido una bomba de calor aire/agua que aumenta la temperatura de esta última hasta 80°C gracias a una compresión en dos etapas. Se trata de la bomba YUTAKI S80, con un COP de 4,05 (para las condiciones de 7°C en el exterior y salida de agua a 35°C). Esta bomba utiliza el R410a como fluido frigorífico pero igualmente hace uso del R134a para la segunda compresión.



**Figura 28: Bomba de calor Yutaki S80**

Ver anexo 7 para las características técnicas de la bomba de calor elegida.

## CICLO DE BRAYTON INVERSO Y MOTOR STIRLING

La segunda de las soluciones contempladas es un ciclo de Brayton inverso acoplado al motor Stirling. Igualmente, se adjuntará un alternador al final para la producción de electricidad.

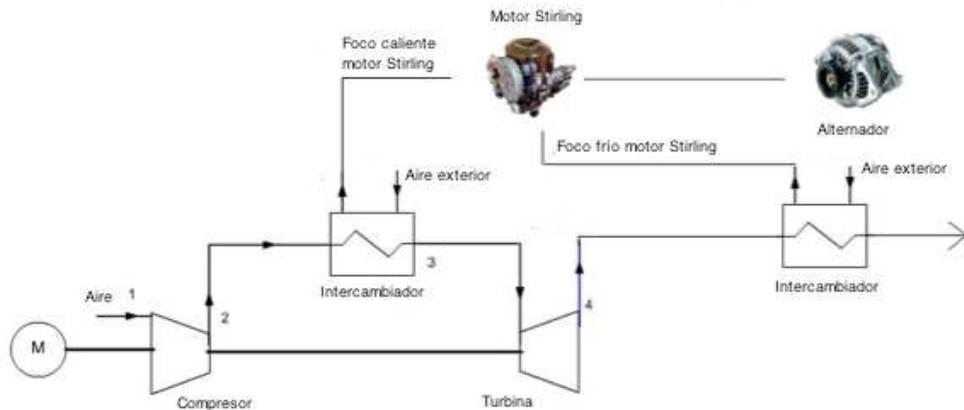


Figura 29: Sistema del ciclo de Brayton inverso con motor Stirling

Como se aprecia en la figura anterior, el compresor es alimentado por un motor eléctrico, dado el escaso trabajo que produce la turbina. El primer intercambiador se convierte en el foco caliente del motor Stirling mientras que el segundo, situado posterior a la turbina, va a ser el foco frío y último paso antes de climatizar la sala. Igual que en el caso de la bomba de calor, al crear una diferencia de temperatura mayor, el rendimiento del motor Stirling aumentará y, por lo tanto, la producción de electricidad.

### Estudio del ciclo de Brayton inverso

- Cálculo del flujo másico.

En el ciclo de Brayton inverso abierto únicamente hay un fluido circulando en el sistema. En este caso, se trata del aire ambiente aspirado. Su gasto másico se determina por la siguiente fórmula:

$$Q_m = \frac{P_{calorífica}}{C_p(T_{entrada} - T_{clim})}$$

Donde la potencia calorífica son los 150 kW que genera el Data Center en forma de calor.

- Compresión.

Se supondrá adiabática. Se puede determinar la temperatura de salida del compresor con esta relación de compresión y temperaturas:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Y esa temperatura se empleará también para determinar el trabajo de compresión del ciclo:

$$W_{comp} = \frac{Cp \cdot (T_2 - T_1)}{\eta_{isen} \cdot \eta_{mec}}$$

- Los intercambiadores de calor.

Este ciclo emplea dos intercambiadores de calor correspondientes a los focos caliente y frío del motor Stirling. La temperatura fría del motor se va a fijar a 20°C. Gracias a las fórmulas de las eficiencias de los intercambiadores, se puede determinar la temperatura caliente del motor Stirling, así como la temperatura caliente a la salida del intercambiador.

$$T_{cm} = T_{f,em} + E_f \cdot (T_c - T_{f,em})$$

$$T_{c,si} = T_c + E_c \cdot (T_c - T_{f,em})$$

Del mismo modo, con el intercambiador del foco frío del motor:

$$T_{fm} = T_c + E_c \cdot (T_c - T_4)$$

- Expansión.

La última etapa del ciclo de Brayton inverso consiste en una expansión supuesta adiabática. La temperatura a la salida y su trabajo se determinan con las ecuaciones siguientes:

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$W_{exp} = \eta_{isen} \cdot \eta_{mec} \cdot Cp \cdot (T_3 - T_4)$$

- Balance.

Una vez se han calculado los elementos anteriores, se determina el trabajo neto de compresión así como la potencia eléctrica a suministrarle para que pueda funcionar.

$$W = |W_{comp}| - |W_{exp}|$$

$$P_{mot} = \frac{Q_m}{\eta_{mot}} (|W_{comp}| - |W_{exp}|)$$

Con las ecuaciones indicadas anteriormente, y las condiciones iniciales que se reflejan en las bases del proyecto, se ha llevado a cabo un estudio (desarrollado en el anexo 8) para el ciclo de Brayton inverso.

Parámetros del estudio			
Potencia a disipar	150	kW	<u>150000</u> W
Temperatura salida local	45	°C	<u>318,15</u> K
Temperatura salida turbina	3	°C	<u>276,15</u> K
Temperatura entrada local	15	°C	<u>288,15</u> K

Constantes	
Gamma	1,4
Cp	1004 J/kg

Rendimiento	
Mecánico	0,9
Isentrópico	0,8
Alternador	0,8

Balance			
W efectivo del compresor	54490,063	J/kg	193,832 kW
W efectivo de la turbina	-24518,586	J/kg	-87,218 kW
Calor aportado al motor Stirling	-47347,253	J/kg	-168,424 kW
W efectivo del motor Stirling	-9671,388	J/kg	-34,403 kW
Balance $W_C + W_T$	29971,477	J/kg	106,615 kW
Balance Total ( $W_C + W_T + W_{MS}$ )	20300,089	J/kg	72,211 kW

Se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 5: Resultados estudio ciclo Brayton**

A partir de los cálculos realizados en el anexo 8, se han obtenido una serie de observaciones y conclusiones.

#### Observaciones:

- En este sistema es la etapa de la compresión la que más afecta al balance. De este modo, la eficiencia del sistema disminuye fuertemente a medida que la presión del punto 2 aumenta. De ahí que se fije la alta presión entre 1 y 2 bares. No obstante, si la presión es demasiado débil, no pueden obtenerse las temperaturas deseadas a la salida del ciclo. La naturaleza de este ciclo permite la obtención de temperaturas de salida (caliente y fría) extremas.
- Para poder extraer la máxima energía al aire que circula por el ciclo, limitando el consumo, sólo se trata una parte del aire del local pero se fija una temperatura de salida del Brayton lo más baja posible.
- Recalentar el aire en el punto 3 permitiría aumentar el trabajo de la turbina pero genera un compromiso con el trabajo del motor Stirling. Así, el aumento de trabajo de la turbina se anularía con la disminución del mismo del motor Stirling, razón por la que esta solución no se ha desarrollado.

#### Conclusiones:

- La solución final lleva a cabo una mezcla del aire tratado por el ciclo que sale a 3°C y una parte no enfriada. Esto permite reducir el caudal de aire comprimido y reducir también el consumo eléctrico. No obstante, pese a todas estas mejoras, el ciclo de Brayton inverso ofrece una eficiencia débil.

## ALTERNADOR

Un motor Stirling requiere un generador eléctrico acoplado a su eje para la conversión de su salida mecánica en electricidad. Existen generadores disponibles de una gran variedad de voltajes así como de corriente alterna o continua. Habitualmente, estos generadores se emplean para aplicaciones concretas, como son la generación eólica, hidroeléctrica, solar, nuclear...

La inducción magnética es el proceso de producción de corriente eléctrica al mover un imán cerca de un cable o cerca de un embobinado. Si se trata de un embobinado, el imán afectará a más espiras y la producción de corriente será mayor. Del mismo modo, si se aumenta la velocidad a la que se mueve el imán, se aumentará de forma proporcional la producción de energía eléctrica. También puede aumentarse la fuerza del imán, pero aumentaría su tamaño restándole practicidad. Por este motivo se trabaja con electroimanes, una bobina cuyo núcleo está formado por hierro que aumenta la fuerza del campo magnético.

Cuando el imán gira sobre una flecha, los impulsos eléctricos varían a medida que los polos negativo y positivo se acercan al embobinado. Esta corriente eléctrica que varía de positivo a negativo se conoce como corriente alterna.

Ahora bien, si en este Proyecto se decide trabajar con una batería que deba ser cargada con el sistema propuesto (por ejemplo: bomba de calor con motor de Stirling y alternador), la corriente debe ser continua y no alterna. Esta transformación se consigue con un circuito rectificador de diodos. Un diodo rectificador suprime las semiondas negativas y permite el paso de las positivas, generando una corriente continua pulsatoria. Con la rectificación doble o de onda completa, se aprovechan todas las semiondas:

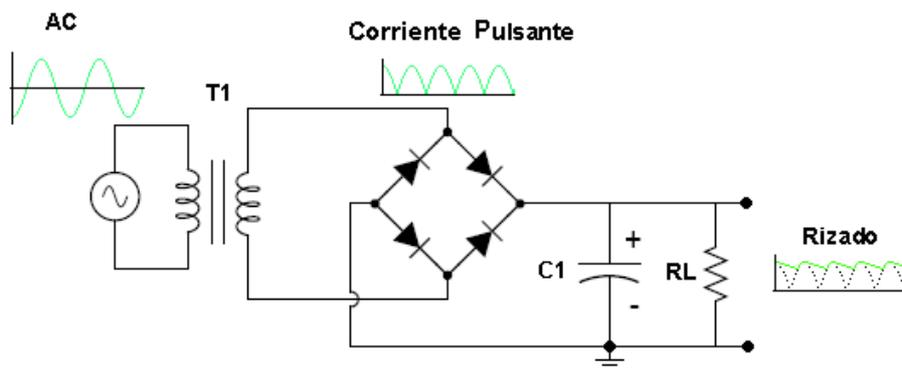


Figura 30: Circuito de rectificación doble

En definitiva, los generadores convierten energía mecánica en energía eléctrica usando un centro de rotor rodeado de un estator de imanes que crean un campo magnético. El rotor interactúa con un electroimán o un imán permanente para generar corriente.

La elección del tipo de alternador va a depender de la velocidad y de la potencia nominal que se vaya a obtener del motor Stirling y se vaya a almacenar en baterías o a enviar a la red eléctrica. En el segundo caso, a partir de la potencia del alternador, se podrá definir la tensión de conexión a la red.

Los alternadores empleados en el sector eólico resultan interesantes si la velocidad de rotación del motor es muy lenta. En ese caso, será necesario incluir un sistema multiplicador o electrónica de potencia si se pretende hacer un ataque directo desde el árbol de la generatriz.

Si la velocidad del motor está en la gama de revoluciones de 3000, 1500, 750... es conveniente usar un generador estándar, síncrono o asíncrono, y no se precisará de electrónica de potencia si se decide la conexión a la red eléctrica. Los típicos motores Stirling operan entre 400 y 600 rpm, con algunos casos excepcionales que alcanzan las 1200 rpm. Se va a tomar la hipótesis de que el motor de este Proyecto trabaja a 600 rpm.

Entonces, entre las alternativas más interesantes se encuentran: la máquina síncrona (que puede ser de rotor de imán permanente porque no se necesita mucha potencia), una máquina de inducción funcionando como generador y un alternador de turismo o de vehículo industrial (los de moto funcionan con más revoluciones).

## La máquina síncrona

Su circuito equivalente detallado es el siguiente:

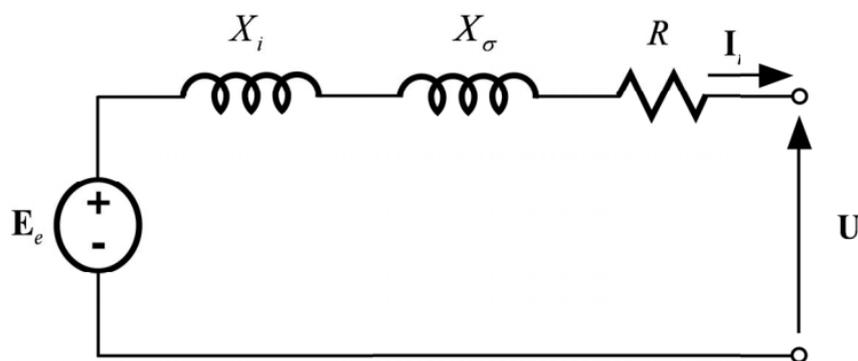


Figura 31: Circuito equivalente máquina síncrona

Donde  $X_1$  representa la reactancia de dispersión del estator y  $X_\sigma$  la reactancia de magnetización.

Para arrancar la máquina síncrona hay que hacer que gire, con el motor Stirling en este caso, y luego hay que inyectarle una excitación. Una vez que la intensidad de excitación es la nominal, y está girando a velocidad también nominal, en el estator hay tensión nominal.

En este Proyecto, al no tratarse de mucha potencia la que se necesita, podría emplearse una máquina síncrona de imanes permanentes. De este modo, la excitación por corriente continua no sería necesaria y, por lo tanto, se podría prescindir de la batería si se decide reinyectar la corriente a la red.

Los generadores de imanes permanentes son la mejor elección en términos de eficiencia, baja fricción, tamaños compactos, bajo peso y robustez. Su diseño de baja fricción permite convertir energía mecánica en eléctrica con poca resistencia. Se suelen usar en generación eólica pero puede emplearse en casi cualquier aplicación. Son de mantenimiento relativamente sencillo y dan resultados fiables.

Otra ventaja de la máquina síncrona es que puede funcionar con carga pasiva y red infinita. Así, si se decidiera trabajar sólo con una batería, únicamente sería necesario añadir un puente rectificador de diodos a la salida de la máquina síncrona y almacenar la salida como corriente continua.

La principal desventaja es que, al no haber trabajado sobre el control de velocidad del motor Stirling, no es posible garantizar que la velocidad vaya a estar en sincronismo con la máquina. Entre otras razones, la velocidad puede variar si cambia el gradiente de temperaturas o si varía la presión de la sala.

## La máquina asíncrona

En la siguiente figura se muestra el circuito equivalente fase-neutro de la máquina de inducción con el rotor reducido al estator.

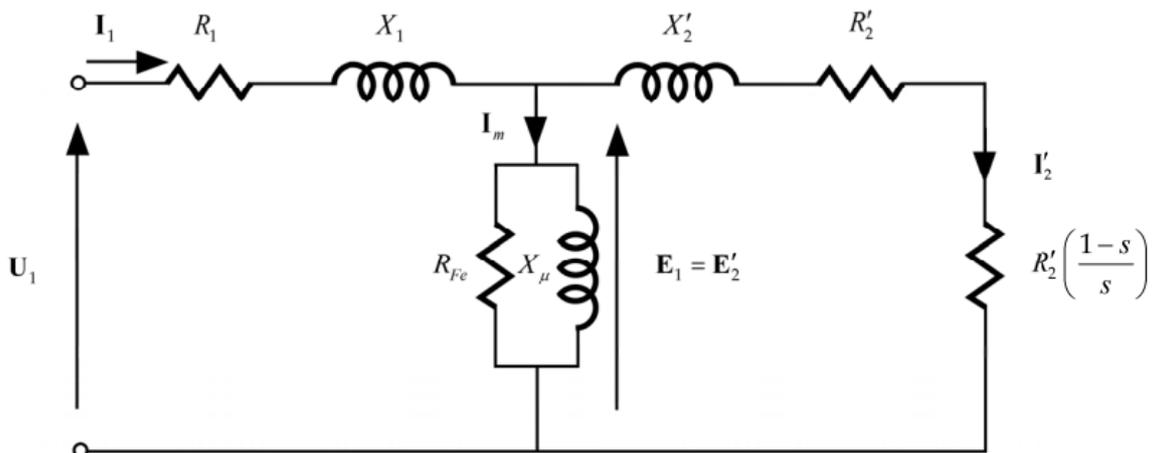


Figura 32: Circuito equivalente fase-neutro máquina de inducción

Donde,

- $R_1$  y  $R_2$  representan las pérdidas en el cobre del estator y del rotor,
- $X_1$  y  $X_2$ , el flujo no concatenado,
- $R_M$  las pérdidas en el hierro,
- $X_M$  el flujo mutua y
- $R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right)$  la potencia electromecánica.

La curva característica par-deslizamiento muestra la zona de funcionamiento normal de la máquina, y está separada en cuadrantes según el funcionamiento como motor o como generador. En este caso, se trabajaría en la zona izquierda de la curva, cuando la máquina asíncrona trabaja como generador. El deslizamiento sería, pues, negativo.

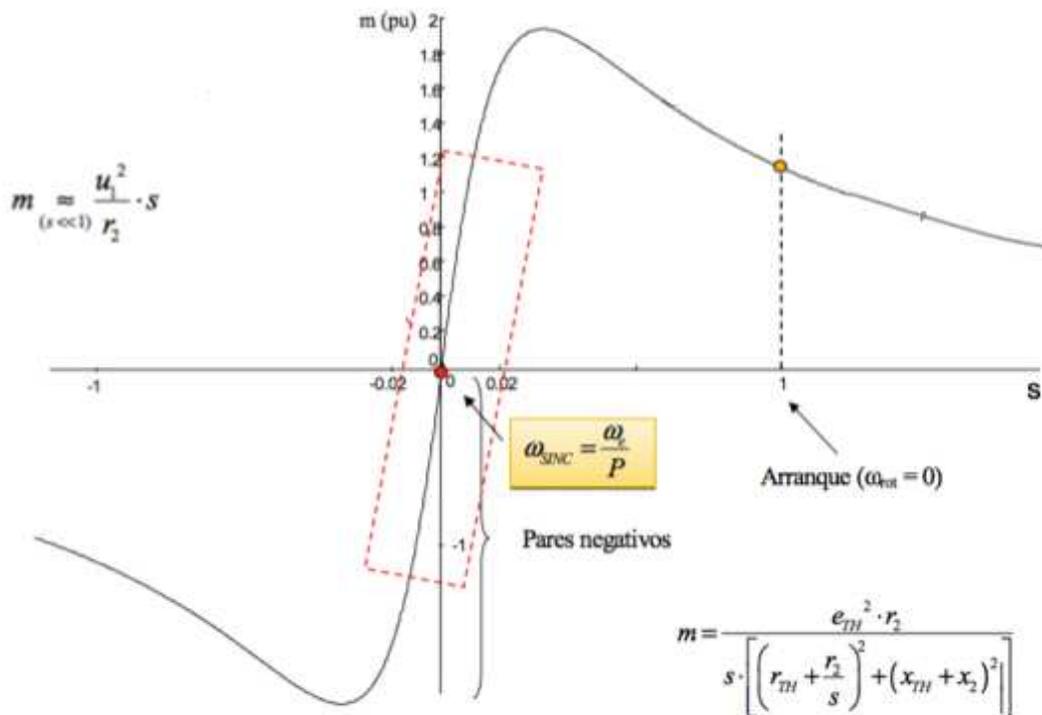


Figura 33: Curva par-deslizamiento de la máquina asíncrona

Una ventaja es que el par es directamente proporcional al deslizamiento y no es condición indispensable que se tenga la velocidad de sincronismo en el eje del motor Stirling. Sin embargo, si la velocidad de rotación son 600 rpm se necesitaría una

multiplicadora de un número no entero, pues el deslizamiento si la relación de velocidades fuese 1:2,

$$s = \frac{w_{de} - w_{rot}}{w_{de}} = \frac{1000 - 1200}{1000} = 0,2 = -20\%$$

Y típicamente es un valor entre el 2 y el 5%, siempre inferior al 10%. Aquí, la ausencia del control de velocidad no supondría un problema (siempre que la velocidad de rotación fuese diferente a la dada) pues existe el deslizamiento.

No obstante, una desventaja es que la máquina de inducción cuando funciona como generador necesita estar conectada a una red, es decir, no puede generar en isla. Esto se debe a que para generar necesita de una red que pueda dar reactiva. Como consecuencia, si se quiere trabajar devolviendo la energía a la red, habría que tener una batería para poder excitar la máquina de inducción igualmente, y si se quisiese trabajar simplemente con una batería, no sería posible.

### Alternador trifásico

El alternador trifásico es uno de los constituyentes eléctricos más importantes en un vehículo. Se encarga de transformar las revoluciones que ocurren por motor de combustión en energía eléctrica para cargar la batería y alimentar el resto de elementos eléctricos del vehículo. Por este motivo, lo hace en corriente continua.

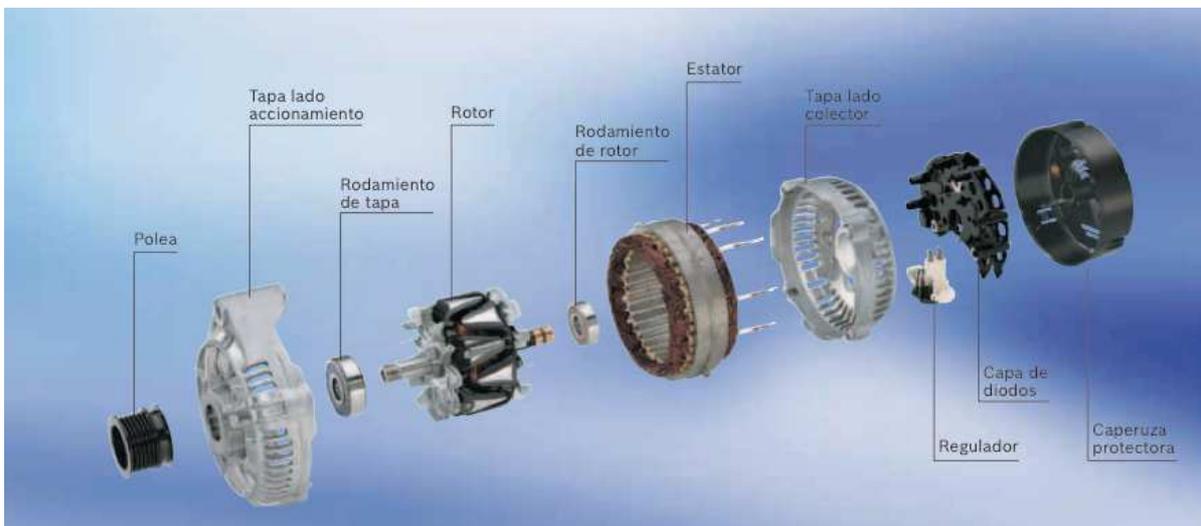


Figura 34: Componentes del alternador

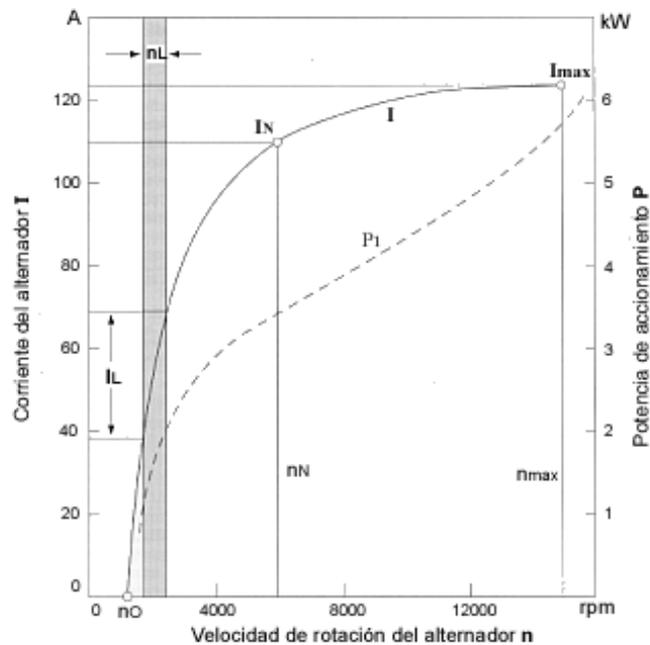
A diferencia de las otras alternativas anteriormente expuestas, el alternador no necesita que la velocidad de rotación tenga un valor concreto. Al estar diseñado para

vehículos, el alternador empieza a cargar la batería a bajas revoluciones, y continúa haciéndolo en función de la velocidad que le llega del motor de combustión.

En este caso, si el motor Stirling gira a 600 rpm y se incluye una multiplicadora de relación 1:2, las 1200 rpm resultantes conseguirían cargar una batería totalmente descargada en aproximadamente 10h (con un alternador de 45 Ah). Aun así, el rendimiento de un alternador aumenta con la velocidad de giro, por lo que suele procurarse que esa relación sea lo más alta posible. En el caso de los turismos, ese valor suele encontrarse entre 1:2 y 1:3, mientras que en los vehículos industriales se llega hasta 1:5.

De forma habitual, la intensidad que proporciona un alternador en función de las revoluciones a las que se le somete, se representa con las curvas características, que representan el comportamiento del alternador ante las distintas velocidades. Precisamente al ser constante la relación de multiplicación, las revoluciones representadas son muy diversas. Las curvas características se refieren a una tensión constante, y también a temperaturas definidas. Por ejemplo, la temperatura de comprobación del calentamiento final del alternador es de 23°C del ambiente o de 80°C del entorno.

En la siguiente figura, la curva característica del alternador trifásico tipo N1:



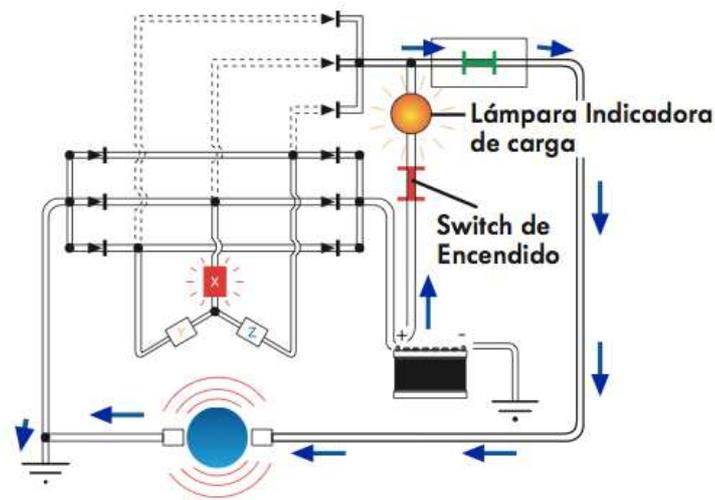
**Figura 35: Velocidad de rotación alternador según intensidad y la potencia**

- La velocidad de amperaje nulo ( $n_0$ ) se refiere a la velocidad a la que el alternador alcanza la tensión nominal pero a la cual no suministra corriente. Sólo puede dar corriente a velocidades superiores.

- La velocidad  $n_L$  es la velocidad con el motor en ralentí. En el diagrama es la zona gris, dado que el valor exacto depende de la relación fijada respecto al motor Stirling. A esta velocidad sí que se suministra corriente. En función del tipo de alternador y la relación de multiplicación, las velocidades puede variar de 1500 a 1800 rpm aproximadamente. Como mínimo, la necesaria para el funcionamiento en conexión prolongada. De hecho, el alternador trifásico entrega en situación de ralentí un tercio de su potencia nominal.
- La velocidad de rotación inicial se representa como  $n_A$ . Es superior a la velocidad de ralentí y depende de la potencia de excitación, de la tensión de la batería y de la variación de la aceleración. Según la velocidad de rotación del motor Stirling, no se va a trabajar a la velocidad nominal del alternador, ni a la velocidad de rotación máxima, aunque va a seguir proporcionando carga en casi cualquier situación. Un ejemplo de situación desfavorable, si el alternador estuviese trabajando como componente de un vehículo, sería que el régimen de revoluciones fuese excesivamente bajo. No bastaría para cargar la batería y alimentar los aparatos eléctricos y la electrónica del sistema eléctrico del vehículo, y la batería se descargaría. Pero en este Proyecto, al acoplar el alternador al motor Stirling, fuera de un vehículo, este problema no sería grave.

En cuanto al funcionamiento del alternador, hay que tener en cuenta que, cuando está cargando, la corriente de excitación procede del mismo alternador. Pero cuando se arranca el motor, la tensión inducida por magnetismo residual en el núcleo de hierro del devanado de excitación no es suficiente, y es necesaria la preexcitación –la corriente tiene que venir de otra fuente pues la autoexcitación es posible cuando la tensión del alternador supera la caída de tensión en albos diodos (es decir, 1,4 V) –.

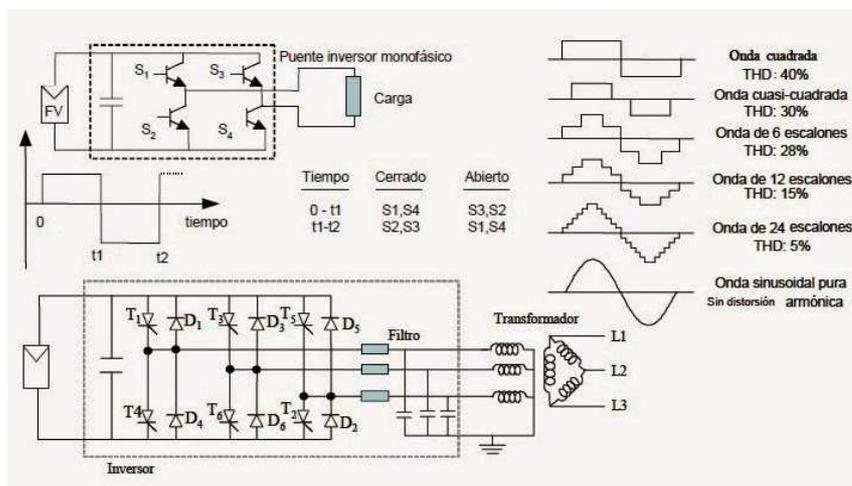
Los alternadores se excitan a través de la lámpara de verificación de carga. La corriente para excitar los devanados fluye de la batería al interruptor de encendido y, de ahí, a la lámpara indicadora de carga. Después, al regulador de voltaje y entonces al rotor. En esas condiciones los alternadores dan carga desde 1000 rpm aproximadamente. Si no hay lámpara de excitación el alternador puede autoexcitarse por la remanencia del núcleo de hierro pero hay que subirle al menos a 4000 rpm. Si más se bajan las revoluciones, se sigue dando carga.



**Figura 36: Funcionamiento del alternador cuando se arranca**

De cara a este Proyecto, es necesario elegir alternador que sea fácilmente excitable. Por otra parte, los alternadores modernos, de más rendimiento, suelen necesitar saber que están en el coche para funcionar. Un alternador de un 85% de rendimiento puede dar muchos amperios a bajas revoluciones pero, si no sabe que está bien conectado en el coche, se protege y no da ninguna carga.

Por añadidura, no es buena idea trabajar con un alternador sin batería. Entre las funciones de ésta se encuentran: mantener la referencia de la tensión de la línea y funcionar como una capacidad muy grande en paralelo para proteger el regulador. No obstante, puede bastar con una fuente que la simule. Si finalmente se decide trabajar con una conexión a la red, sería más sencillo convertir la corriente continua en alterna sin eliminar la presencia de la batería con un inversor:



**Figura 37: Circuito de inversión de DC a AC**

En resumen, algunas de las características de los alternadores trifásicos son:

- Hay entrega de potencia aunque se esté en situación de ralentí. Así, incluso si la velocidad del motor Stirling no fuese constante –ya se ha dicho que varía con la temperatura y la presión, entre otros factores–, se podría seguir cargando la batería o alimentando los componentes eléctricos que se desee.
- La corriente trifásica se rectifica con diodos de potencia. La salida es por lo tanto, continua, pero podría volver a invertirse si fuese necesario.
- Dichos diodos separan el alternador de la batería cuando la tensión del alternador no alcanza el nivel de tensión de la batería. Por el mismo principio, no permiten que la batería se descargue en el sentido del alternador.
- Son muy resistentes a las influencias externas, como son temperaturas extremas, humedad, vibraciones...



# ESTUDIO ECONÓMICO

El objetivo de este apartado es presentar una estimación de lo que supondría la inversión para instalar este sistema, en cuanto a precio de los componentes.

## Bomba de calor

La bomba de calor HITACHI Yutaki S80 tiene un precio de 16.070 €.

Referencia: RWH6.0FSVNFE + RAS6HVRNME – AF + DHWS260S – 2.0H1E.

La ficha con sus características técnicas se encuentra en el anexo 7.

Sin embargo, dado que la bomba de calor seleccionada no cumple todas las condiciones establecidas, se trata de una estimación del precio final. Sería necesario construirla a medida.

## Ciclo de Brayton inverso

La mayor inversión es la correspondiente al compresor. El caudal puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$Q_m = \frac{P_{\text{calorífica}}}{C_p(T_{\text{entrada}} - T_{\text{clim}})}$$

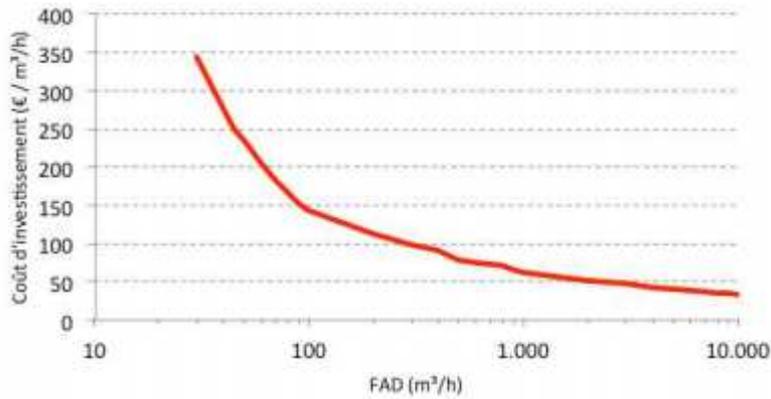
Debería ser equivalente a 5kg/s, es decir 16.216 m<sup>3</sup>/h a 1,5 bar.

Sobre las curvas del anexo 10, se trabaja a 7 bar así que se va a estimar el coste según flujo másico a esa presión.

De entre dichas curvas se ha seleccionado un compresor de tornillo en lugar de uno de pistón. La limitación de los compresores de pistón es que no soportan caudales superiores a 1.000 m<sup>3</sup>/h.

Más adelante se constata que el coste de los compresores de tornillo lubricado resultan más baratos que los compresores de tornillo no lubricado. Sin embargo, el tener que mantener el sistema lubricado hace que no sea tan económico.

La siguiente curva muestra una relación entre el coste de inversión y el caudal del compresor, para compresores de tornillo lubricado.



**Figura 38: Relación coste inversión y caudal para compresores de tornillo lubricado**

De esta curva se deduce que, para un caudal de 3.475 m<sup>3</sup>/h se tiene un coste de inversión de aproximadamente 45 €/m<sup>3</sup>/h.

En este proyecto, la inversión sería de 156.375 €, pero el 45 % de este valor supone el precio de la instalación del sistema.

Por otra parte, hay que añadir lo correspondiente al intercambiador y a la turbina y sumarle el precio de la instalación, dado que estos sistemas no pueden adquirirse como una sola pieza ya ensamblada.

## Motor Stirling

VISSMANN emplea en algunas de sus calderas un motor Stirling de 5 kW. Según fuentes de la empresa, los precios de ese tipo de caldera, con y sin motor Stirling asciende a:

El precio de una caldera con un motor Stirling de 5 kW cuesta 20.000 €.

El precio de una caldera sin motor Stirling cuesta 4.000 €.

Por lo tanto se estima que un motor Stirling de 5 kW tiene un precio de 16.000 €. Así, para 1 kW, un motor costaría alrededor de 3.200 €.

Según otras fuentes que datan de 2002, existen motores Stirling con precios desde 3.924 €/kW hasta 34.339 €/kW.

En la tabla que se muestra a continuación se encuentran varios proveedores de motores Stirling que venden al por menor, en función de los kW<sub>e</sub> de los sistemas.

**Stirling Engine Retail/End User Prices**

Company	Product	kW <sub>e</sub>	\$/kW <sub>e</sub>	units/yr
Kockums	Engine	25	4,000	1
STM	System	25	1,000	50
Sunpower	Engine	1	35,000	1
Uwe Moch	Engine Kit	0.5	6,800	10
Whisper Tech	DC System	1.1	11,000	250

**Tabla 6: Precios de motor Stirling para venta al por menor**

Si se toma un precio de 4.000 €/kW, sabiendo que el motor Stirling del Proyecto debería tener una potencia de 40 kW, el precio ascendería a 160.000 €.

## Alternador

La lista de fabricantes de alternadores trifásicos se puede encontrar en el anexo 10. Existe mucha variedad en función del voltaje y el amperaje deseado.

Finalmente, se ha decidido emplear un alternador fabricado por Bosch, destinado para un motor del camión IVECO Eurocargo.

Marca:	<b>HOLDWELL</b>
Número OEM:	<b>0124655005</b>
Número de modelo:	<b>HW250028</b>
Amperaje:	<b>90A</b>
Voltaje:	<b>24V</b>

El precio de este producto asciende a 420 €.

Mientras que la batería que se usa en este tipo de vehículos, la batería de camión y vehículo industrial Varta Promotive Black I18 110 Ah, cuesta 250 €.



## CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Se han estudiado las dos soluciones retenidas de acuerdo con FIMATEC, es decir, el ciclo de Brayton inverso y la bomba de calor. Ambos acoplados a un motor Stirling y éste a su vez a un alternador. Se ha aplicado el estudio a un Centro de Procesado de Datos para disponer de una referencia de industria en la que se desperdiciase calor.

El balance resultante de la bomba de calor es:

Mecánica de compresión	Eléctrica consumida	Calorífica creada	Eléctrica creada
-185 kW	-264 kW	700 kW	54,43 kW

Mientras que el del ciclo de Brayton inverso:

$W_C$	$W_T$	Calor aportado al motor	W del motor	$W_C + W_T$	$W_C + W_T + W_{MS}$	$W_{ELEC}$
-193,832 kW	87,218 kW	-168,424 kW	34,403 kW	-106,615 kW	-72,211 kW	58,49 kW

Sin embargo, el precio de la bomba de calor es de 16.070 € cuando solamente el compresor del ciclo de Brayton asciende a más de 156.000 €. Además, como se ha dicho anteriormente, no se puede adquirir un sistema como el que se necesita en el ciclo de Brayton inverso sino que habría que agregar los intercambiadores y la turbina al conjunto de la instalación.

El análisis de las dos opciones ha mostrado que ambas soluciones eran factibles técnicamente pero la referida al ciclo de Brayton inverso no era económicamente viable. De hecho, implica una inversión muy grande dada la potencia de la que debe disponer el compresor. Igualmente es imposible procurarse el producto ensamblado, dado que en los aviones que lo utilizan, el compresor es el mismo que se emplea para propulsar la aeronave. Además, con el ciclo de Brayton inverso, la producción de electricidad final es muy débil en comparación con lo que consume el compresor. Por lo tanto, este sistema no permitiría reducir los gastos energéticos de una climatización en el caso de un Data Center (o Centro de Procesado de Datos).

La solución que utiliza una bomba de calor necesita una inversión menos importante que el del ciclo de Brayton inverso. La generación de electricidad continúa siendo baja aunque sí que podría suponer una disminución del consumo eléctrico con respecto a una climatización clásica. Así, esta solución es factible para que remplace los sistemas de

refrigeración existentes en las industrias. No obstante, no existe en el mercado una bomba de calor que disponga de la potencia que se precisaría, aunque se puede acceder fácilmente a las otras alternativas.

El motor Stirling que se emplearía es de tipo alfa pues es el que genera un movimiento de rotación y no de traslación, además de tener un rendimiento elevado. Pero actualmente, no existen muchos fabricantes que comercialicen a pequeña escala o con potencias interesantes. Es una tecnología que, habitualmente, se desarrolla por empresas energéticas que emplean el producto en sus propias instalaciones.

El alternador que se ha decidido emplear se corresponde a uno de vehículo, pues suponía más ventajas respecto a una máquina síncrona o una de inducción. La tabla comparativa se muestra a continuación:

	Batería			Conexión a red		
	<i>Máquina síncrona</i>	<i>Máquina asíncrona</i>	<i>Alternador trifásico</i>	<i>Máquina síncrona</i>	<i>Máquina asíncrona</i>	<i>Alternador trifásico</i>
<b>Ventajas</b>	Excitación CC disponible siempre	-	Excitación CC disponible siempre Funcionamiento normal	Funcionamiento normal	Funcionamiento normal	-
<b>Desventajas</b>	No hay control de velocidad del motor Adición de rectificador	No puede funcionar en isla Adición de rectificador	Menor potencia que las otras alternativas	Adición de batería para disponer de excitación	-	Precisan de batería para funcionar bien Adición de inversor y transformador

**Tabla 7: Resumen ventajas y desventajas uso batería frente a conexión a red**

Además, es preferible trabajar con una batería aunque se podría contemplar reinyectar la energía obtenida en la red. No puede emplearse una máquina síncrona porque no existe un control de velocidad para el motor Stirling y la máquina de inducción sólo permite la devolución de la energía a la red.

## FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Este Trabajo de Fin de Grado puede servir de inicio para futuras líneas con el fin de continuar y avanzar más en la dirección tomada. Entre algunas de las aportaciones que se pueden hacer se encuentra el control de velocidad del motor Stirling. Ya se comentó en apartados anteriores que este aspecto no se había trabajado y es uno de los motivos por los que no se puede emplear una máquina síncrona en la última etapa del sistema.

Dada la dificultad para encontrar fabricantes de este motor, sería interesante analizar más en profundidad su funcionamiento y plantearse llegar a la fase de prototipado.

Del mismo modo, se pueden realizar cálculos de optimización para mejorar el rendimiento del conjunto. Por ejemplo, estudiar cómo acoplar el motor Stirling a la bomba de calor de manera que no se desperdicie energía calorífica.

Para la conexión del sistema tratado en este Proyecto a la red eléctrica, se necesita información sobre las leyes actuales sobre producción descentralizada y la conexión a la red. También se necesitan datos sobre el precio de venta del kWh que proceda de esta instalación. Una vez que todo eso se haya solucionado, habrá que considerar la parte del comando del sistema así como la protección eléctrica.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.solociencia.com/ingenieria/07032603.htm>
- [2] <https://www.technologyreview.es/materiales/46232/transformar-el-calor-en-electricidad-puede-evitar/>
- [3] <http://datos.bancomundial.org/pais/espana>
- [4] <http://termoelectricidad-teleco.blogspot.fr/>
- [5] <http://www.fondoemprendedores.fundacionrepsol.com/es/proyectos/generacion-electricidad-aprovechando-calor-residual>
- [6] <http://www.dw.com/es/electricidad-a-partir-de-calor/a-16105681>
- [7] <https://www.fayerwayer.com/2011/06/nueva-aleacion-convierte-el-calor-directamente-en-electricidad/>
- [8] <http://www.um.edu.ar/catedras/claroline/backends/download.php?url=L03zZHVsb19WL0dydXBvc19lbGVjdHlzZ2Vub3MucGRm&cidReset=true&cidReq=4071>
- [9] <http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/hot-cold-aisle>
- [10] [https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/Intro/Chapt.1\\_6/Chapter4c.html](https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/Intro/Chapt.1_6/Chapter4c.html)
- [11] <http://www.concienciaeco.com/2010/11/23/que-es-la-cogeneracion/>
- [12] <http://www.absorsistem.com/tecnologia/cogeneracion/principio-de-la-cogeneracion>
- [RAPI93] P. J. Rapin. “Instalaciones frigoríficas”. 1993
- [REY\_05] F. J. Rey & E. Velasco. “Bombas de calor y Energías renovables en edificios.(U.V.A)”. Madrid, 2005.
- [PITA91] Edward G. Pita. “Principios y sistemas de refrigeración”. 1991.
- [LINA12] Prof. José Ignacio Linares Hurtado. “Termodinámica técnica y máquinas térmicas”. Julio 2012.
- [13] *Climatisation des salles informatiques*, Emerson, San Luis, MO, EEUU. 2015.
- [BELH15] Aroua Belhadj. “Analyse expérimentale de la performance thermoélectrique des modules générateurs”. 2015.
- [14] *Aircraft characteristics. Airport and maintenance planning*, Airbus, Toulouse, Francia. 2015
- [15] <http://www.fastcodesign.com/>

- [16] [http://www.caib.es/consellerias/industria/dgener/user/portaenergia/pla\\_eficiencia\\_energetica/climatitzacio\\_1.es.html](http://www.caib.es/consellerias/industria/dgener/user/portaenergia/pla_eficiencia_energetica/climatitzacio_1.es.html)
- [WYLE86] Van Wylen, G., Sonntag, R. “Fundamentals of Classical Thermodynamics”. New York, 1986.
- [17] Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 61 (2006), No. 2, pp. 237-245  
[http://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/pdf/2006/02/costea\\_vol61\\_n2.pdf](http://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/pdf/2006/02/costea_vol61_n2.pdf)
- [ZHAN12] W. Zhang, L. Chen, F. Sun. “Thermodynamic optimization principle for open inverse Brayton cycle (refrigeration/heat pump cycle)”. 2012
- [18] Air Cycle Refrigeration Systems:  
<http://nptel.ac.in/courses/112105129/pdf/RAC%20Lecture%209.pdf>
- [19] <http://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/cycle-brayton-inverse.html>
- [20] <http://www.stiral.com/technologies/pac/>
- [21] <http://www.recuperation-chaleur.fr/pompe-chaleur>
- [22] <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/6148/6148-cours-pompe-chaleur.pdf>
- [23] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10825>
- [LANC15] N. Lanciaux. “Contribution au développement d’un moteur Stirling : De la cogénération dans le bâtiment à l’autonomie énergétique”. 2015.
- [BONN05] Sébastien Bonnet. Moteurs thermiques à apport de chaleur externe: étude d’un moteur STIRLING et d’un moteur ERICSSON. 2005.
- [24] <http://www.dimclim.fr/climatisation-de-confort.php>
- [MART78] William R. Martini, University of Washington. “Stirling engine design manual”. 1978.
- [KONG06] Bancha Kongtragool, Somchai Wongwises, “Performance of low-temperature differential Stirling engines”, 2006.
- [25] Stirling Engine Assessment, 2002.  
<http://www.engr.colostate.edu/~marchese/mech337-10/epri.pdf>
- [BELH15] A. Belhadj. “Analyse expérimentale de la performance thermoélectrique des modules générateurs”. 2015.
- [26] <http://www.moteurstirling.com/index.php>
- [27] Tabla de termodinámica de fluidos frigoríficos:  
[http://www.tmt.ugal.ro/crios/Support/IFPC1/Misc/SI\\_F09\\_Ch30.pdf](http://www.tmt.ugal.ro/crios/Support/IFPC1/Misc/SI_F09_Ch30.pdf)

[28] <http://stirling-engine-en.blogspot.com.es/2013/07/solar-dish-stirling-power-plant.html>

[ROLL\_] Kurt C. Rolle. "Termodinámica".

[WALK80] G. Walker. "Stirling Engines". 1980.

[29] Departamento de Interior de EEUU. "Managing Water in the West: Power Resources Office". 2005, pg 6. Hydroelectric Power.

[CHAN\_] Chan, Tze Fun, Lan, Loi Len. "Sustainable Energy Development".

[KEVE00] Keveney, M. "Two Cylinder Stirling Engine." 2000.

[30] "Stirling Engines - Mechanical Configurations." Ohio University. N.p., Apr. 2010.

[STIR17] R. Stirling, Improvements for diminishing the consumption of fuel and in particular, an engine capable of being applied to the moving of machinery on a principle entirely new. Patente británica número 5456. 1817.

[31] *Motores de arranque y alternadores*, Bosch, Gerlingen, Alemania. 2012.

[32] *Funcionamiento y sistemas de carga*, Hella, Madrid, España.

[33] *Bosch Automotive Handbook*, Bosch, Gerlingen, Alemania. 2011.

[PURC88] E. M. Purcell. "Electricidad y magnetismo". 1988.

[MILL13] Miller, Rich. "Too Hot for Humans, But Google Servers Keep Humming." Data Center Knowledge. 2013.

[34] <http://es.alternatorsupplier.com>

[35] [www.yubasolar.net](http://www.yubasolar.net)



# ANEXOS

## ANEXO 1: Acta de la reunión *co-design*

El concepto *co-design* viene de *co-operative design*, y es una práctica que se emplea en muchas empresas en el proceso de diseño de un nuevo proyecto. Trata de incluir a empleados, clientes, ciudadanos y a los usuarios en general para tener una visión global de lo que se necesita antes de empezar y que toque todos los niveles que se verían afectados por el producto en su proceso. También recibe el nombre de diseño participativo por ser una técnica centrada en procesos y procedimientos del diseño de forma que todos los depositarios puedan participar.

En el caso de este Proyecto de Fin de Grado, la sesión de Co-design no tuvo lugar al inicio del mismo sino que fue a la mitad. Por este motivo, se centró en los problemas técnicos que el estudio presentaba, y no en el diseño desde la base.

A esta sesión asisten profesionales y expertos en la materia, entre ellos el jefe de la entidad colaboradora, y varios técnicos de termodinámica, y electricidad. Del mismo modo, se contó con la presencia de un animador responsable de dirigir la jornada.

### Descripción de la sesión de *co-design*

- Presentación

Para comenzar la sesión, los miembros de la reunión son presentados dando a conocer sus funciones y competencias. Entonces, el animador presenta el desarrollo de la sesión y el objetivo de la misma. Finalmente, el responsable del Proyecto introduce el sujeto a tratar de manera que todos los participantes comprendan el objetivo de éste.

- Taller de presentación de las soluciones energéticas y de reflexión

En este primer taller, el grupo se dividió en dos personas con el objetivo de trabajar simultáneamente sobre dos temáticas: el ciclo de Brayton inverso y la bomba de calor.

La primera parte de esta actividad consistía en formular todas las preguntas y problemáticas que tuviesen relación con el tema de cada mesa. Más adelante, se evaluó durante un cuarto de hora cada posible solución hasta que tuvo lugar el cambio de mesa para poder reflexionar sobre la segunda problemática propuesta.

La segunda parte de esta actividad tenía por objetivo adentrarse en las pistas de soluciones, consejos... Cada uno aportaba ideas que eran jerarquizadas para tratarlas más tarde. Siguiendo el principio de la primera parte, se dialogaba durante 15 minutos sobre los problemas presentados.

Cuando ambos grupos pasaron por las dos mesas, se da parte de la información recuperada para que llegue a todos los participantes.

Para la continuación de la sesión, el grupo se dividió en dos diferentes a los iniciales. Uno de los grupos continuó con el análisis de la parte térmica y su problemática mientras que la otra se centró en el estudio de la electricidad del sistema. En los dos partes, se guiaba a los grupos con pistas para la continuación del proyecto. Ahí, se empezaron a rellenar las fichas de actuación.

Ficha de actuación:

<p><b><u>Etapa 1</u></b>          Encontrar el trabajo de compresión para el ciclo de Brayton inverso.</p>	<p>- Determinar el gasto másico y dejar de trabajar con datos hipotéticos.</p>
<p><b><u>Etapa 2</u></b>          ¿Cómo elegir entre los tipos de motor Stirling?</p>	<p>- Se dispone de la temperatura de la fuente caliente y del caudal, lo que permite obtener la potencia del motor.</p> <p>- Verificar que se va a recuperar en torno al 30% de la energía mecánica del motor (como máximo).</p>

<p><b><u>Etapa 3</u></b></p> <p>Compromiso entre la temperatura caliente y el rendimiento del motor Stirling.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Depende de la compresión.</li> <li>- Si se busca una temperatura más caliente, se ha de aumentar la compresión.</li> <li>- Precaución con la alta presión de la cual no hay que bajar (el compresor siempre va a funcionar pero la turbina no generará trabajo útil)</li> <li>- Tratar de comenzar a 3 bares de presión y aumentar de manera proporcional para averiguar lo que se obtiene a la salida.</li> </ul>
<p><b><u>Etapa 4</u></b></p> <p>Encontrar la presión que se da en el habitáculo del motor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Habitualmente, la máxima presión es de 15 bares.</li> <li>- Estimar y comparar a los motores existentes en el mercado.</li> </ul>

<p><b><u>Etapa 5</u></b></p> <p>Verificar las etapas de cálculo de la bomba de calor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emplear el diagrama de Mollier para la bomba de calor.</li>   <li>- Emplearlo también para verificar los rendimientos.</li>   <li>- La temperatura de evaporación del fluido es inferior a 25°C.</li>   <li>- Es necesario optimizar la escala de temperaturas.</li>   <li>- Escoger el fluido frigorífico que se corresponda con nuestras necesidades.</li>   <li>- Debe existir un mínimo de 10°C entre el fluido frigorífico y el aire que circule por la bomba de calor.</li>   <li>- Verificar si se va a emplear el intercambiador de calor de Stirling como condensador. Si no, se tendrá que emplear un bucle intermedio compuesto de un ventilador y de una bomba.</li> </ul>
---	---

**Tabla 8: Ficha de actuación frente a las problemáticas planteadas en el co-design**

Respecto a la parte eléctrica del proyecto, no se ha podido avanzar verdaderamente sobre todo debido a la falta de información sobre el motor Stirling. De hecho, es

necesario conocer la potencia y la velocidad de rotación del motor para empezar a estudiar su acoplamiento al alternador. Como estos parámetros permanecen como incógnitas, no es posible avanzar en ese aspecto.

Se reflexiona sobre las diferentes posibilidades que conciernen el empleo de la electricidad producida. La primera (y la más factible) es reinyectar directamente la electricidad producida en la red eléctrica de la empresa. La siguiente alternativa sería reinyectarla en la red nacional. No obstante, esta solución parece más complicada de llevar a cabo pues precisa de acuerdos con los distribuidores y los gestores de la red. Por lo tanto, el proyecto se centrará en la primera solución. También se contempla emplear directamente el calor disponible para calentar otras habitaciones, entre otras cosas. Pero el socio comanditario no considera esta solución como posible. Por otra parte, y en función de la cantidad de electricidad producida, podría ser interesante almacenarla en baterías para poder usar más adelante.

En cuanto al motor Stirling, se buscarán otras alternativas pues no se encuentra información sobre fabricantes o proveedores. Conceptos como el efecto Seebeck y otros proyectos de termoelectricidad se tendrán en cuenta para el avance del estudio. El efecto Seebeck, como ya se ha mencionado, reagrupa una categoría de materiales que generan corriente eléctrica de manera proporcional a una diferencia de temperatura a la que se les somete.

Con esta última actividad, hubo una puesta en común para formular las últimas preguntas a la empresa patrocinadora del proyecto para saber sobre qué soluciones se debía continuar el trabajo.

- Fin de la sesión:

Para finalizar la sesión, cada uno de los participantes expresó sus conclusiones sobre la jornada.

### **Ideas extraídas de la sesión:**

- 1) Para poder encontrar las características de las que no se dispone en cuanto a los materiales y componentes, hay que basarse en los sistemas existentes y ponerse en contacto con las empresas que los produzcan. De ahí, se obtendrán aproximaciones de precio, potencia, dimensiones...
- 2) En el caso particular de la bomba de calor, será necesario incluir un sistema de ventilación para aspirar el aire del edificio. Concretamente, se recomienda crear una depresión, con un ventilador a la entrada y otro a la salida.
- 3) Para eliminar la escarcha a la salida de la turbina del ciclo de Brayton inverso, habrá que emplear un sistema de deshumidificación.
- 4) Para una mejora del rendimiento y evitar una consumición excesiva en el conjunto del sistema, encontrar el valor de temperatura a la salida de la bomba de calor o del ciclo de Brayton inverso.

### **Conclusiones:**

Esta sesión debía permitir una selección del sistema final. No obstante, se llegó a la conclusión de que la información de la que se disponía no era suficiente para tomar esa decisión. En realidad, siendo los costes finales de las distintas instalaciones diferentes se debe realizar un balance de rentabilidad económica y térmica sobre cada una de las soluciones retenidas.

Así pues, se va a continuar con el estudio de ambos sistemas: la bomba de calor acoplada al motor Stirling y el ciclo de Brayton inverso acoplado al motor Stirling. El objetivo de esto es determinar las prestaciones de cada sistema en función de su coste. En función de la potencia calorífica disponible (como referencia 150kW evacuados del Data Center a tratar), se determinará sistema más apropiado.

En resumen, se profundizará en el análisis de los sistemas de la bomba de calor del ciclo de Brayton inverso. En este estudio se va a realizar un balance de potencia y un balance económico. Esto permitirá escoger el sistema más idóneo para el escenario definido por el cliente. De forma paralela, se va a comparar el motor Stirling con otras formas de transformar calor en energía mecánica sin necesidad de combustión, dados los escasos proveedores de motor Stirling encontrados.

## ANEXO 2: Diagrama de Gantt

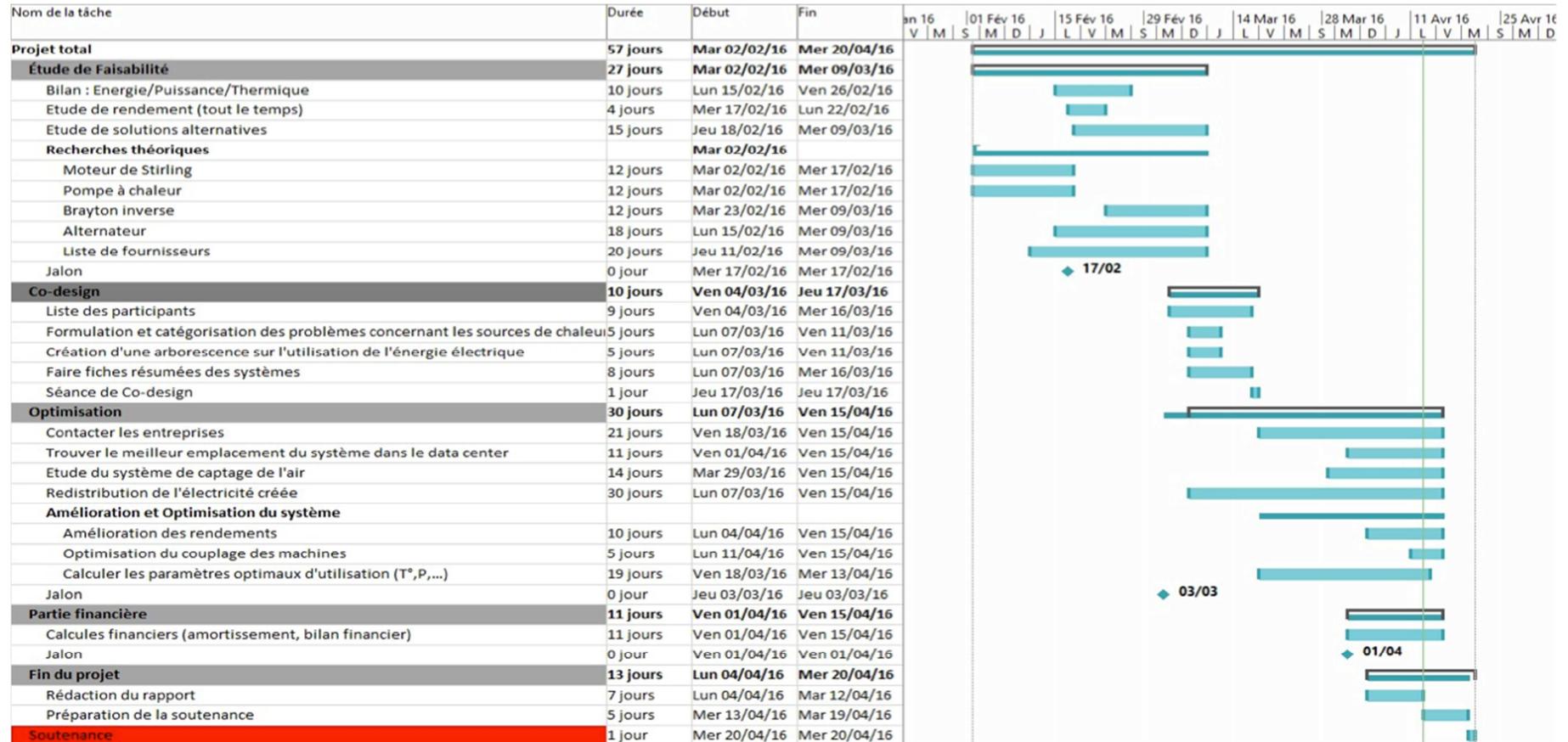


Figura 39: Diagrama de Gantt

# ANEXO 3: Estudio teórico del motor Stirling

Rendimiento teórico en función de temperatura y relación de volúmenes máximo y mínimo

$$\eta = \frac{R(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}) \cdot \ln \frac{V_{\text{máx}}}{V_{\text{mín}}}{Cv \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}) + R T_{\text{máx}} \cdot \ln \frac{V_{\text{máx}}}{V_{\text{mín}}}}$$

Constantes		
Temperatura fría del motor	20	293,15
Constante r	287	287
CV aire (seco)	718	718

Parámetros de la tabla	
Paso de temperatura	25
Mín. relación de compres.	1
Máx. relación de compres.	100

Rendement de moteur de Stirling en fonction du delta de température et du rapport de compression																
Temp en C° et en K	20	45	70	95	120	145	170	195	220	245	270	295	320	345	370	395
Rapport de compression Vmax/Vmin	293,15	318,15	343,15	368,15	393,15	418,15	443,15	468,15	493,15	518,15	543,15	568,15	593,15	618,15	643,15	668,15
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,807692308	0	0,0698	0,11825578	0,1538009	0,1810038	0,20249285	0,21989721	0,23428044	0,24636635	0,25666463	0,26554459	0,27328035	0,28007968	0,2861029	0,29147573	0,29629812
8,615384615	0	0,072	0,12461551	0,16473515	0,19634087	0,22188283	0,24295335	0,2606321	0,27567703	0,28863594	0,29991454	0,30981976	0,31858804	0,32640451	0,33341618	0,33974125
12,42307692	0	0,0729	0,12729238	0,16944567	0,20306919	0,23051408	0,25334009	0,27262273	0,28912766	0,30341474	0,31590288	0,32691171	0,33668939	0,34543151	0,35329431	0,3604041
16,23076923	0	0,0734	0,12885475	0,17222544	0,20707465	0,23568917	0,25960475	0,27989101	0,29731586	0,31244481	0,32570358	0,33741876	0,34784508	0,35718414	0,36559759	0,37321653
20,03846154	0	0,0737	0,12991118	0,17411794	0,20981661	0,2392478	0,26392883	0,28492385	0,30300121	0,3187296	0,33253892	0,3447602	0,35565248	0,36542137	0,37423213	0,38221914
23,84615385	0	0,074	0,13068839	0,17551693	0,21185142	0,2418971	0,26715662	0,28868926	0,30726315	0,32344893	0,33767935	0,35028855	0,36153866	0,37163817	0,38075501	0,38902595
27,65384615	0	0,0742	0,13129235	0,17660803	0,21344306	0,24397443	0,26969273	0,29165292	0,31062266	0,32717384	0,34174129	0,35466147	0,36619884	0,37656413	0,3859273	0,39442698
31,46153846	0	0,0743	0,13178005	0,17749162	0,21473502	0,2456639	0,27175866	0,29407051	0,31336644	0,33021925	0,34506531	0,3582429	0,37001833	0,38060409	0,39017179	0,39886157
35,26923077	0	0,0745	0,13218521	0,17822741	0,21581293	0,24707569	0,27348737	0,29609578	0,31566726	0,3327752	0,34785722	0,36125305	0,37323051	0,38400353	0,3937451	0,40259658
39,07692308	0	0,0746	0,13252924	0,1788534	0,21673147	0,24828038	0,27496414	0,29782758	0,31763633	0,33496423	0,35024988	0,36383422	0,37598633	0,38692136	0,39681344	0,40580499
42,88461538	0	0,0747	0,13282646	0,17939515	0,21752749	0,24932556	0,27624664	0,29933281	0,31934902	0,33686945	0,35233348	0,36608311	0,37838844	0,38946571	0,39949	0,40860464
46,69230769	0	0,0748	0,13308688	0,1798705	0,2182268	0,2502447	0,27737543	0,30065861	0,3208585	0,33854953	0,35417178	0,36806809	0,3805095	0,39171313	0,40185495	0,41107908
50,50000000	0	0,0748	0,13331772	0,18029241	0,21884815	0,25106209	0,27838003	0,30183929	0,32220352	0,34004731	0,35581131	0,36983911	0,38240258	0,39371963	0,40396698	0,41328945
54,30769231	0	0,0749	0,13352435	0,18067052	0,21940551	0,25179589	0,27928249	0,30290056	0,3234131	0,34139485	0,35728696	0,37143368	0,38410757	0,39552727	0,40587016	0,41528817
58,11538462	0	0,075	0,13371086	0,18101216	0,21990956	0,25245997	0,2800997	0,30386207	0,32450949	0,34261678	0,35862552	0,37288055	0,38565507	0,39716835	0,40759838	0,41709117
61,92307692	0	0,075	0,13388043	0,18132306	0,22036859	0,25306514	0,28084484	0,30473919	0,32551006	0,34373231	0,35984792	0,37420224	0,38706905	0,39866818	0,40917817	0,41874556
65,73076923	0	0,0751	0,13403556	0,18160773	0,22078921	0,25361999	0,28152835	0,30554412	0,32642862	0,34475676	0,36097084	0,37541669	0,38836859	0,40004691	0,41063069	0,42026692
69,53846154	0	0,0751	0,13417826	0,18186981	0,22117669	0,25413141	0,28215865	0,3062867	0,32727632	0,34570246	0,36200772	0,37653834	0,3895691	0,40132082	0,41197301	0,42167309
73,34615385	0	0,0751	0,13431018	0,18211225	0,22153536	0,25460504	0,28274263	0,30697494	0,32806224	0,3465795	0,36296955	0,37757905	0,39068319	0,40250324	0,41321914	0,42297868
77,15384615	0	0,0752	0,13443266	0,1823375	0,22186877	0,25504552	0,28328595	0,30761549	0,32879392	0,3473962	0,36386543	0,37854859	0,39172129	0,4036052	0,41438063	0,42419577
80,96153846	0	0,0752	0,13454681	0,18254757	0,22217988	0,25545672	0,28379334	0,30821387	0,32947762	0,34815955	0,36470295	0,37945516	0,39269213	0,40463591	0,41546719	0,42533448
84,76923077	0	0,0752	0,13465358	0,18274417	0,22247119	0,25584189	0,28426879	0,30877474	0,33011864	0,3488754	0,36548853	0,38030565	0,39360306	0,40560317	0,41648698	0,42640335
88,57692308	0	0,0753	0,13475377	0,18292876	0,22274481	0,25620382	0,28471568	0,30930208	0,33072147	0,34954874	0,3662276	0,38110592	0,39446034	0,40651358	0,41744697	0,42740965
92,38461538	0	0,0753	0,13484806	0,18310255	0,22300254	0,25654485	0,28513691	0,30979925	0,33128995	0,35018386	0,36692483	0,38186101	0,39526933	0,40737282	0,4183531	0,4283596
96,19230769	0	0,0753	0,13493702	0,18326661	0,22324594	0,25686703	0,28553496	0,3102692	0,33182741	0,35078443	0,36758424	0,38257526	0,39603467	0,40818579	0,41921053	0,42925858
100	0	0,0754	0,13502116	0,18342185	0,22347635	0,25717212	0,28591199	0,31071443	0,33233672	0,35135364	0,36820934	0,38325242	0,39676036	0,40895674	0,42002374	0,43011127

Tabla 9: Rendimiento teórico del motor Stirling en función de variables

## ANEXO 4: Estudio teórico diferentes tipos de motor Stirling

Con los datos planteados en la memoria,

$V_{SE}$	600	cm <sup>3</sup>	0,0006 m <sup>3</sup>
$V_{DE}$	100	cm <sup>3</sup>	0,0001 m <sup>3</sup>
$V_{SC}$	600	cm <sup>3</sup>	0,0006 m <sup>3</sup>
$V_{DC}$	100	cm <sup>3</sup>	0,0001 m <sup>3</sup>
$dx$	90	deg	1,570796327 rad
$V_R$	300	cm <sup>3</sup>	0,0003 m <sup>3</sup>
$P_{min}$	1	bar	10000 Pa
Velocidad de rotación	1.000	rpm	16,67 Hz
$T_C$	30	°C	303,15 K
$T_E$	140	°C	413,15 K
$T_R$	85	°C	358,15 K

La temperatura del regenerador es una media aritmética entre las temperaturas del gas cuando se comprime y cuando se expande.

Se han hecho tres estudios de forma separada, uno para cada tipo de motor. El objetivo es poder representar el diagrama PV de los tres motores para evaluar el trabajo por el área que encierran las curvas finales.

### Tipo alfa

Para este motor se han empleado una serie de ecuaciones para el cálculo del volumen:

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + V_{DE}$$

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2}\{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC}$$

$$V = V_E + V_R + V_C$$

Además de varios ratios:

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}}$$

$$t = \frac{T_C}{T_E}$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}}$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}}$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}}$$

$$a = \tan^{-1} \frac{v \cdot \sin dx}{t + \cos dx}$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC}$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \cos dx + v^2}$$

y definiendo  $c$  como

$$c = \frac{B}{S}$$

Entonces

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{S^2 - B^2}}{S - B \cos(x - a)} = \frac{P_{mean} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)}$$

Tabla de cálculos motor tipo alfa						
Ángulo	cos( $\theta$ )	cos( $\theta - dx$ )	V <sub>E</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>C</sub> (m <sup>3</sup> )	V (m <sup>3</sup> )	P (Pa)
0 (360)	1,0000	0,0000	0,0001	0,0004	0,0008	18142,6863
10	0,9848	0,1736	0,0001	0,0003	0,0008	19446,1333
20	0,9397	0,3420	0,0001	0,0003	0,0007	20683,0723
30	0,8660	0,5000	0,0001	0,0003	0,0007	21745,7923
40	0,7660	0,6428	0,0002	0,0002	0,0007	22518,7329
50	0,6428	0,7660	0,0002	0,0002	0,0007	22903,5421
60	0,5000	0,8660	0,0003	0,0001	0,0007	22846,5586
70	0,3420	0,9397	0,0003	0,0001	0,0007	22355,9298
80	0,1736	0,9848	0,0003	0,0001	0,0008	21498,9214
90	0,0000	1,0000	0,0004	0,0001	0,0008	20380,9654
100	-0,1736	0,9848	0,0005	0,0001	0,0009	19117,6730
110	-0,3420	0,9397	0,0005	0,0001	0,0009	17811,9310
120	-0,5000	0,8660	0,0006	0,0001	0,0010	16541,9274
130	-0,6428	0,7660	0,0006	0,0002	0,0011	15359,1982
140	-0,7660	0,6428	0,0006	0,0002	0,0011	14292,6455
150	-0,8660	0,5000	0,0007	0,0003	0,0012	13354,6491
160	-0,9397	0,3420	0,0007	0,0003	0,0013	12546,9006
170	-0,9848	0,1736	0,0007	0,0003	0,0013	11864,9882
180	-1,0000	0,0000	0,0007	0,0004	0,0014	11301,6075
190	-0,9848	-0,1736	0,0007	0,0005	0,0014	10848,6330
200	-0,9397	-0,3420	0,0007	0,0005	0,0015	10498,3679
210	-0,8660	-0,5000	0,0007	0,0006	0,0015	10244,2528
220	-0,7660	-0,6428	0,0006	0,0006	0,0015	10081,2402
230	-0,6428	-0,7660	0,0006	0,0006	0,0015	10005,9787
240	-0,5000	-0,8660	0,0006	0,0007	0,0015	10016,8936
250	-0,3420	-0,9397	0,0005	0,0007	0,0015	10114,2142
260	-0,1736	-0,9848	0,0005	0,0007	0,0014	10299,9706
270	0,0000	-1,0000	0,0004	0,0007	0,0014	10577,9554
280	0,1736	-0,9848	0,0003	0,0007	0,0013	10953,6229
290	0,3420	-0,9397	0,0003	0,0007	0,0013	11433,8672
300	0,5000	-0,8660	0,0003	0,0007	0,0012	12026,5783
310	0,6428	-0,7660	0,0002	0,0006	0,0011	12739,8188
320	0,7660	-0,6428	0,0002	0,0006	0,0011	13580,3944
330	0,8660	-0,5000	0,0001	0,0006	0,0010	14551,5234
340	0,9397	-0,3420	0,0001	0,0005	0,0009	15649,2908
350	0,9848	-0,1736	0,0001	0,0005	0,0009	16857,7114

Tabla 10: Cálculos motor tipo alfa

## Tipo beta

De forma análoga, una serie de ecuaciones definen los parámetros del motor tipo beta:

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + V_{DE}$$

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2}(1 + \cos x) + \frac{V_{SC}}{2}\{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC}$$

$$V = V_E + V_R + V_C$$

La presión se define igual que en el motor tipo alfa:

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{min} (1 + c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{max} (1 - c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)}$$

También se definen unos ratios:

$$X_B = \frac{V_B}{V_{SE}}$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}}$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}}$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}}$$

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1}$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1 - 2X_B$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cos dx + v^2 - 2t + 1}$$

$$c = \frac{B}{S}$$

$$t = \frac{T_C}{T_E}$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}}$$

Tabla de cálculos motor tipo beta						
Ángulo	cos( $\theta$ )	cos( $\theta - dx$ )	V <sub>E</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>C</sub> (m <sup>3</sup> )	V (m <sup>3</sup> )	P (Pa)
0	1,0000	0,0000	0,0001	0,0010	0,0014	18487,2204
10	0,9848	0,1736	0,0001	0,0009	0,0013	19127,4467
20	0,9397	0,3420	0,0001	0,0009	0,0013	19541,6150
30	0,8660	0,5000	0,0001	0,0008	0,0013	19684,6761
40	0,7660	0,6428	0,0002	0,0007	0,0012	19540,2278
50	0,6428	0,7660	0,0002	0,0007	0,0012	19124,8294
60	0,5000	0,8660	0,0003	0,0006	0,0011	18483,6462
70	0,3420	0,9397	0,0003	0,0005	0,0011	17679,4462
80	0,1736	0,9848	0,0003	0,0005	0,0011	16779,5913
90	0,0000	1,0000	0,0004	0,0004	0,0011	15845,4094
100	-0,1736	0,9848	0,0005	0,0004	0,0011	14926,0945
110	-0,3420	0,9397	0,0005	0,0003	0,0011	14056,9663
120	-0,5000	0,8660	0,0006	0,0003	0,0011	13260,6777
130	-0,6428	0,7660	0,0006	0,0003	0,0012	12549,8177
140	-0,7660	0,6428	0,0006	0,0003	0,0012	11929,7816
150	-0,8660	0,5000	0,0007	0,0003	0,0013	11401,3007
160	-0,9397	0,3420	0,0007	0,0003	0,0013	10962,4177
170	-0,9848	0,1736	0,0007	0,0004	0,0013	10609,9080
180	-1,0000	0,0000	0,0007	0,0004	0,0014	10340,2441
190	-0,9848	-0,1736	0,0007	0,0005	0,0015	10150,2190
200	-0,9397	-0,3420	0,0007	0,0005	0,0015	10037,3296
210	-0,8660	-0,5000	0,0007	0,0006	0,0016	10000,0002
220	-0,7660	-0,6428	0,0006	0,0007	0,0016	10037,6956
230	-0,6428	-0,7660	0,0006	0,0007	0,0016	10150,9562
240	-0,5000	-0,8660	0,0006	0,0008	0,0017	10341,3626
250	-0,3420	-0,9397	0,0005	0,0009	0,0017	10611,4219
260	-0,1736	-0,9848	0,0005	0,0009	0,0017	10964,3438
270	0,0000	-1,0000	0,0004	0,0010	0,0017	11403,6562
280	0,1736	-0,9848	0,0003	0,0010	0,0017	11932,5800
290	0,3420	-0,9397	0,0003	0,0011	0,0017	12553,0633
300	0,5000	-0,8660	0,0003	0,0011	0,0017	13264,3573
310	0,6428	-0,7660	0,0002	0,0011	0,0016	14061,0383
320	0,7660	-0,6428	0,0002	0,0011	0,0016	14930,4754
330	0,8660	-0,5000	0,0001	0,0011	0,0016	15849,9594
340	0,9397	-0,3420	0,0001	0,0011	0,0015	16784,1046
350	0,9848	-0,1736	0,0001	0,0010	0,0015	17683,6502
360	1,0000	0,0000	0,0001	0,0010	0,0014	18487,2204

Tabla 11: Cálculos motor tipo beta

## Tipo gamma

Por último, las ecuaciones del motor tipo gamma:

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + V_{DE}$$

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2}(1 + \cos x) + \frac{V_{SC}}{2}\{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC}$$

$$V = V_E + V_R + V_C$$

La presión,

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{min} (1 + c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{max} (1 - c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)}$$

con los parámetros

$$t = \frac{T_C}{T_E}$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}}$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}}$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}}$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}}$$

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx - 1}$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tV_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cos dx + v^2 - 2t + 1}$$

$$c = \frac{B}{S}$$

Tabla de cálculos motor tipo gamma						
Ángulo	cos( $\theta$ )	cos( $\theta - dx$ )	$V_E$ (m <sup>3</sup> )	$V_C$ (m <sup>3</sup> )	$V$ (m <sup>3</sup> )	P (Pa)
0	1,0000	0,0000	0,0001	0,0004	0,0008	13890,8333
10	0,9848	0,1736	0,0001	0,0004	0,0008	14107,3032
20	0,9397	0,3420	0,0001	0,0003	0,0007	14243,1439
30	0,8660	0,5000	0,0001	0,0003	0,0007	14289,3257
40	0,7660	0,6428	0,0002	0,0003	0,0007	14242,6942
50	0,6428	0,7660	0,0002	0,0003	0,0008	14106,4345
60	0,5000	0,8660	0,0003	0,0003	0,0008	13889,6020
70	0,3420	0,9397	0,0003	0,0003	0,0009	13605,8469
80	0,1736	0,9848	0,0003	0,0004	0,0010	13271,6568
90	0,0000	1,0000	0,0004	0,0004	0,0011	12904,5149
100	-0,1736	0,9848	0,0005	0,0005	0,0012	12521,3139
110	-0,3420	0,9397	0,0005	0,0005	0,0013	12137,2215
120	-0,5000	0,8660	0,0006	0,0006	0,0014	11765,0470
130	-0,6428	0,7660	0,0006	0,0007	0,0016	11415,0434
140	-0,7660	0,6428	0,0006	0,0007	0,0017	11095,0260
150	-0,8660	0,5000	0,0007	0,0008	0,0018	10810,6819
160	-0,9397	0,3420	0,0007	0,0009	0,0019	10565,9613
170	-0,9848	0,1736	0,0007	0,0009	0,0019	10363,4785
180	-1,0000	0,0000	0,0007	0,0010	0,0020	10204,8745
190	-0,9848	-0,1736	0,0007	0,0010	0,0020	10091,1190
200	-0,9397	-0,3420	0,0007	0,0011	0,0021	10022,7427
210	-0,8660	-0,5000	0,0007	0,0011	0,0021	10000,0001
220	-0,7660	-0,6428	0,0006	0,0011	0,0021	10022,9654
230	-0,6428	-0,7660	0,0006	0,0011	0,0020	10091,5636
240	-0,5000	-0,8660	0,0006	0,0011	0,0020	10205,5392
250	-0,3420	-0,9397	0,0005	0,0011	0,0019	10364,3597
260	-0,1736	-0,9848	0,0005	0,0010	0,0018	10567,0529
270	0,0000	-1,0000	0,0004	0,0010	0,0017	10811,9739
280	0,1736	-0,9848	0,0003	0,0009	0,0016	11096,5027
290	0,3420	-0,9397	0,0003	0,0009	0,0015	11416,6815
300	0,5000	-0,8660	0,0003	0,0008	0,0014	11766,8140
310	0,6428	-0,7660	0,0002	0,0007	0,0012	12139,0734
320	0,7660	-0,6428	0,0002	0,0007	0,0011	12523,1946
330	0,8660	-0,5000	0,0001	0,0006	0,0010	12906,3559
340	0,9397	-0,3420	0,0001	0,0005	0,0009	13273,3792
350	0,9848	-0,1736	0,0001	0,0005	0,0009	13607,3659
360	1,0000	0,0000	0,0001	0,0004	0,0008	13890,8333

Tabla 12: Cálculos motor tipo gamma

En cuanto a los trabajos de expansión y compresión y al trabajo útil que se obtiene ( $W_i$ ),

$$W_E = \int P dV_E = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi c \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = \frac{P_{max} V_{SE} \pi c \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}}$$

$$W_C = \int P dV_C = -\frac{P_{mean} V_{SE} \pi c t \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = -\frac{P_{min} V_{SE} \pi c t \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = -\frac{P_{max} V_{SE} \pi c t \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}}$$

$$W_i = W_e + W_c$$

Y en este estudio en concreto, para los tres tipos de motor, el balance es:

	Alfa	Beta	Gamma	
We	4,7087	2,2766	1,0019	J
Wc	-3,4550	-1,6705	-0,7352	J
Wi	1,2537	0,6061	0,2668	J
Potencia	20,8947	10,1024	4,4459	W

La potencia se calcula dividiendo el trabajo útil entre la frecuencia de rotación.

## ANEXO 5: Comparativa climatizadores de diversas potencias y fabricantes

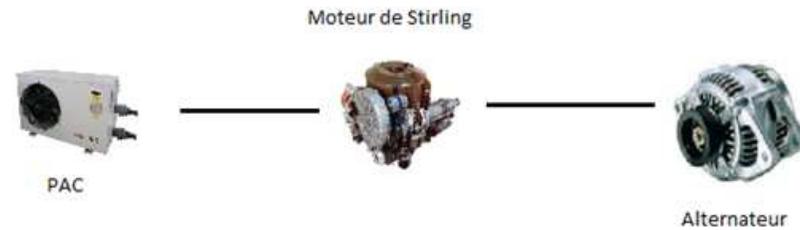
Modelo	Potencia nominal equivalente para 2.000 m <sup>2</sup> (W)	Caudal de aire equivalente para 2.000 m <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /h)	Potencia nominal (W)
Bomba de calor aire/aire monosplit S3331 SIBRO, 3.000W	192548		3000
Climatizador fijo Pack monosplit Mistral AMD351/1 WHIRLPOOL, 3.650W	200000		3650
Climatizador fijo Pack monosplit Mistral AMD352/1 WHIRLPOOL, 5.400W	200000		5400
Climatizador fijo Pack monosplit Mistral AMD350/1 WHIRLPOOL, 2.550W	200000		2550
Climatizador fijo Pack monosplit Alizés AMD355/1 WHIRLPOOL, 3.750W	200000		3700
Climatizador móvil local PACAN112 20m <sup>2</sup> 2.900W DELONGHI	290000	350000	2900
Climatizador móvil local PACWE112ECO 20m <sup>2</sup> 3.000W DELONGHI	300000	340000	3000
Climatizador móvil local PACCN91 2.600W	200000	26923	2600
Climatizador móvil Blyss 2.600W	260000	300000	2600

Modelo	Máxima superficie de climatización (m <sup>2</sup> )	Máximo caudal de aire equivalente (m <sup>3</sup> /h)	Deshumidificador (l/h)	Temperatura mínima de funcionamiento (°C)
Bomba de calor aire/aire monosplit S3331 SIBRO, 3.000W	31		2,6	-15
Climatizador fijo Pack monosplit Mistral AMD351/1 WHIRLPOOL, 3.650W	36,5		1,2	-10
Climatizador fijo Pack monosplit Mistral AMD352/1 WHIRLPOOL, 5.400W	54		1,8	-10
Climatizador fijo Pack monosplit Mistral AMD350/1 WHIRLPOOL, 2.550W	25,5		0,8	-10
Climatizador fijo Pack monosplit Alizés AMD355/1 WHIRLPOOL, 3.750W	37		1,2	-10
Climatizador móvil local PACAN112 20m <sup>2</sup> 2.900W DELONGHI	20	350	1,7	
Climatizador móvil local PACWE112ECO 20m <sup>2</sup> 3.000W DELONGHI	20	340	1,3	
Climatizador móvil local PACCN91 2.600W	26	350	3,6	
Climatizador móvil Blyss 2.600W	20	300	2,5	

Tabla 13: Comparativa de bombas de calor según fabricantes y potencias

## ANEXO 6: Estimación COP bomba de calor para balance eléctrico nulo

Con el sistema que incluye una bomba de calor y un motor Stirling acoplado a un alternador, es decir:



Considerando los rendimientos del motor y del alternador, el COP de la bomba de calor para que el balance sera nulo se muestra a continuación:

COP		$\eta_{\text{motor Stirling}} (\%)$							
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
$\eta_{\text{alternador}} (\%)$	0,7	28,57	14,29	9,52	7,14	5,71	4,76	4,08	3,57
	0,75	26,67	13,33	8,89	6,67	5,33	4,44	3,81	3,33
	0,8	25,00	12,50	8,33	6,25	5,00	4,17	3,57	3,13
	0,85	23,53	11,76	7,84	5,88	4,71	3,92	3,36	2,94
	0,9	22,22	11,11	7,41	5,56	4,44	3,70	3,17	2,78
	0,95	21,05	10,53	7,02	5,26	4,21	3,51	3,01	2,63
	1	20,00	10,00	6,67	5,00	4,00	3,33	2,86	2,50

Tabla 14: Estimación COP bomba de calor para balance eléctrico nulo

## ANEXO 7: Ficha técnica bomba de calor aire – agua Hitachi Yutaki S80

### ■ Aplicaciones:

- Suelo radiante, convectores, radiadores y tanques de agua sanitaria.

■ **Máxima capacidad en calefacción.** Yutaki S80, es la primera bomba de calor del mercado capaz de generar **agua caliente a una temperatura superior a 80°C**, con unas condiciones externas de hasta -20°C.

■ Flexible y fácil de instalar.

■ Utiliza energía renovable, obteniendo una importante disminución en el consumo energético.

■ **Fácil mantenimiento.**

■ La solución ideal para sustituir la caldera, además, ofrece agua caliente sanitaria y calefacción durante todo el año.

■ **Ciclo cascada inteligente** exclusivo de Hitachi, que consigue una eficiencia estacional de A+

■ Mando con amplia pantalla LCD, de uso intuitivo, multilingual y diferentes funciones que mejoran su funcionamiento.

■ Compatible con ATW-KNX-01 (interfaz que centraliza y gestiona las unidades).

### Máxima capacidad en calefacción

Yutaki S80, proporciona la máxima capacidad en calefacción del mercado, las máximas temperaturas de salida de agua (80°C) bajo amplios rangos de funcionamiento, incluso en bajas temperaturas exteriores (-20°C).



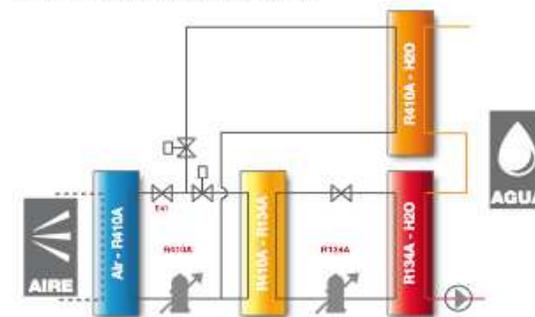
### Fácil mantenimiento

Su diseño exclusivo, permite acceder fácilmente a sus componentes, una vez instalada, los principales componentes están disponibles desde el frente.



### Ciclo "Cascada Inteligente" (smart cascade)

Esta innovación permite conseguir la máxima eficiencia estacional. Se compone de dos compresores con dos refrigerantes, R410A y R134A, que ajusta automáticamente su funcionamiento utilizando el ciclo de refrigeración (R410A) o el ciclo de compresión (R134A). Este ajuste toma en cuenta las condiciones climáticas (hasta -20°C) y las necesidades de calefacción y agua caliente sanitaria, hasta 80°C.



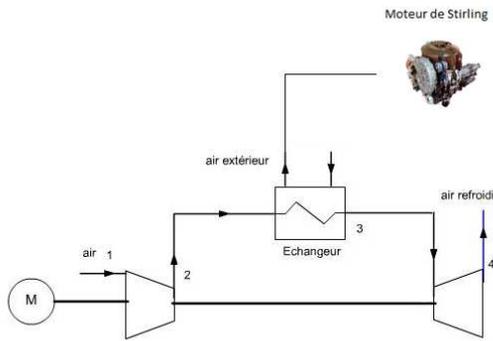
Nombre del conjunto		YUTAKI S80 4V	YUTAKI S80 5V	YUTAKI S80 6V	YUTAKI S80 4	YUTAKI S80 5	YUTAKI S80 6
Unidades interiores		Monofásica			Trifásica		
		RWH 4FSVNFE	RWH 5FSVNFE	RWH 6FSVNFE	RWH 4FSNFE	RWH 5FSNFE	RWH 6FSNFE
Potencia nominal en calefacción 7°C ext./30-35°C agua <sup>(1)</sup>	kW	10,00	12,00	14,00	10,00	12,00	14,00
Potencia nominal absorbida calefacción		0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Capacidad del recipiente de expansión	l	12					
Caudal de agua	m <sup>3</sup> /h	1,70	2,10	2,40	1,70	2,10	2,40
Diámetro de tuberías (Liq. - Gas)	pulgadas	3/8 - 5/8					
Fluido refrigerante		R134A					
Rango de temperatura de salida de agua	°C	20°C ~ 80°C					

Unidades exteriores		RAS 4HVRNME-AF	RAS 5HVRNME-AF	RAS 6HVRNME-AF	RAS 4HRNME-AF	RAS 5HRNME-AF	RAS 6HRNME-AF
COP 7°C ext./30-35°C agua		4,36	4,27	4,05	4,36	4,27	4,05
Clase energética Calefacción		A					
Nivel de presión sonora (modo noche) <sup>(2)</sup>	dB(A)	46	48	50	46	48	50
Caudal de aire Calefacción	m <sup>3</sup> /h	4.800	5.400	6.000	4.800	5.400	6.000
Alimentación	m/m	230V - 1Ph - 50 Hz			400V - 3Ph + N - 50 Hz		
Diámetro de tuberías (Liq. - Gas)	pulgadas	3/8 - 5/8					
Longitud máxima		30					
Desnivel máximo	m	20					
Carga de refrigerante	kg	3,9	4,00	4,00	3,9	4,00	4,00
Fluido refrigerante		R410A					
Compresor		DC Scroll					

Tabla 15: Ficha técnica Bomba de Calor Hitachi Yutaki S80

## ANEXO 8: Aplicación numérica ciclo Brayton inverso

Con el ciclo de Brayton inverso y el motor Stirling acoplado a un alternador y las siguientes condiciones de entrada:



Rendimiento	
Mecánico	0,9
Isentrópico	0,8
Alternador	0,8

Parámetros del estudio			
Potencia a disipar	150	kW	<u>150000</u> W
Temperatura salida local	45	°C	<u>318,15</u> K
Temperatura salida turbina	3	°C	<u>276,15</u> K
Temperatura entrada local	15	°C	<u>288,15</u> K

Constantes	
Gamma	1,4
Cp	1004 J/kg

Y con la siguiente información sobre los 4 puntos característicos del ciclo:

Punto 1: Entrada compresor	
Presión	<u>1</u> bar
Temperatura	<u>318,15</u> K
Temperatura	45,00 °C

Punto 2: Entrada intercambiador	
Presión	<u>1,5</u> bar
Temperatura	<u>357,23</u> K
Temperatura	84,08 °C

Punto 3: Entrada turbina	
Presión	<u>1,5</u> bar
Temperatura	<u>310,07</u> K
Temperatura	36,92 °C

Punto 4: Climatización	
Presión	<u>1</u> bar
Temperatura	<u>276,15</u> K
Temperatura	3,00 °C

Se obtienen los siguientes resultados:

<b>Energía</b>		
<i>A pagar J/kg</i>	<i>Útil J/kg</i>	<i>Rendimiento</i>
<b>29971,477</b>	<b>47347,253</b>	<b>22,70%</b>

<b>Balance</b>				
W efectivo del compresor	<b>54490,063</b>	J/kg	<b>193,832</b>	kW
W efectivo de la turbina	<b>-24518,586</b>	J/kg	<b>-87,218</b>	kW
Calor aportado al motor Stirling	<b>-47347,253</b>	J/kg	<b>-168,424</b>	kW
W efectivo del motor Stirling	<b>-9671,388</b>	J/kg	<b>-34,403</b>	kW
Balance Wc + Wt	<b>29971,477</b>	J/kg	<b>106,615</b>	kW
Balance Total (C + T + MS)	<b>20300,089</b>	J/kg	<b>72,211</b>	kW

<b>Aire que circula por el ciclo</b>				
Gasto másico	<b>3,557</b>	kg/s		
Densidad del aire a extraer	<b>1,109</b>	kg/m <sup>3</sup>		
Caudal	<b>3,207</b>	m <sup>3</sup> /s	<u>11544,60201</u>	m <sup>3</sup> /h
	<b>3206,834</b>	l/s	<u>192410,0335</u>	l/min

<b>Aire que circula por el local</b>				
Gasto másico	<b>4,980</b>	kg/s		
Densidad del aire a extraer	<b>1,109</b>	kg/m <sup>3</sup>		
Caudal	<b>4,490</b>	m <sup>3</sup> /s	<u>16162,44282</u>	m <sup>3</sup> /h
	<b>4489,567</b>	l/s	<u>269374,047</u>	l/min
Gasto másico fuera del Brayton	<b>1,423</b>	kg/s		29 %

<b>Compresor</b>	
<i>HP</i>	<u>1,500</u> bar
<i>Caudal</i>	<u>11544,602</u> m <sup>3</sup> /h
<i>Potencia</i>	<u>193,832</u> kW
<b>Intercambiador</b>	
<i>Gasto másico</i>	<u>3,557</u> kg/s
<i>Potencia</i>	<u>-168,424</u> kW
<i>Temperatura de entrada</i>	<u>84,077</u> °C
<b>Turbina</b>	
<i>HP</i>	<u>1,500</u> bar
<i>Gasto másico</i>	<u>3,557</u> kg/s
<i>Potencia</i>	<u>-87,218</u> kW
<b>Motor Stirling</b>	
<i>Calor aportado al MS</i>	<u>-47347,253</u> J/kg
<i>Rendimiento</i>	<u>22,70%</u>
<i>W teórico</i>	<u>-10745,986</u> J/kg
<i>W efectivo</i>	<u>-9671,388</u> J/kg
<i>Potencia</i>	<u>34,403</u> kW

# ANEXO 9: Coste de inversión respecto al caudal compresor ciclo Brayton inverso.

El coste total de inversión para un compresor de tornillo, lubricado o no, puede ser calculado a partir de las dos gráficas siguientes. El material representa el 55% del precio mientras que la instalación se eleva hasta el 45%.

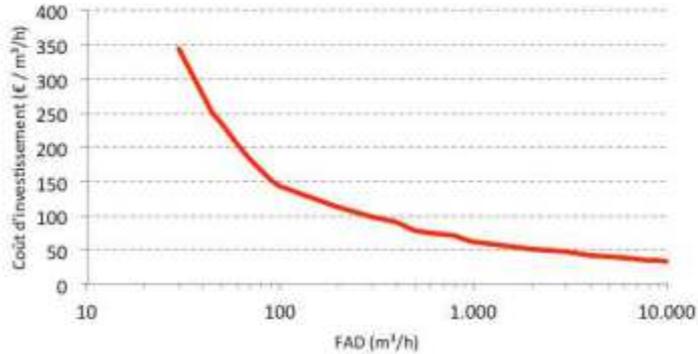


Figura 40: Evolución del coste total (material e instalación) de un compresor de tornillo lubricado

Frente a:

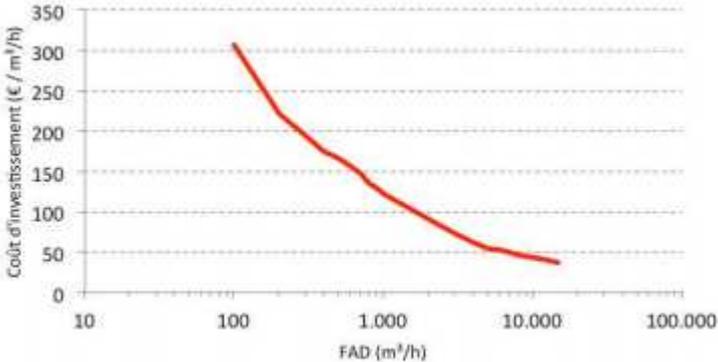
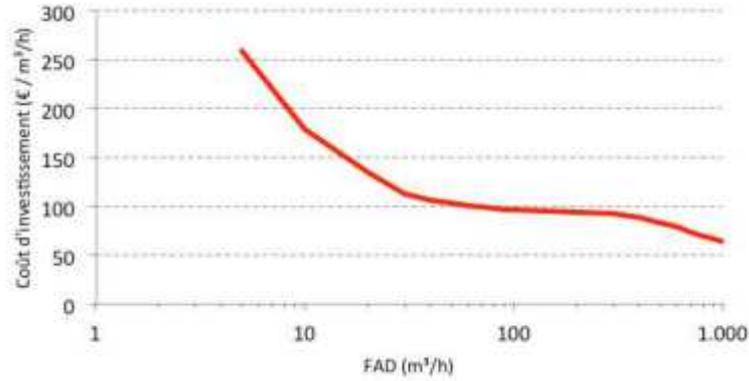
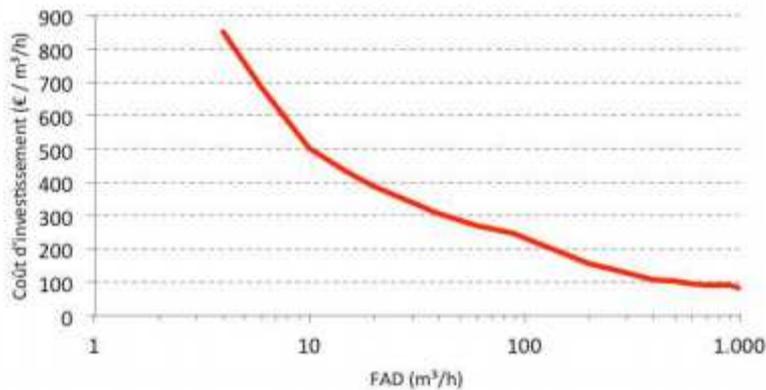


Figura 41: Evolución del coste total (material e instalación) de un compresor de tornillo no lubricado

Por otra parte, si los compresores no son de tornillo sino de pistón, la relación del precio del material frente a la instalación se mantiene, pero las curvas son las siguientes:



**Figura 42: Evolución del coste total de un compresor de pistón lubricado**



**Figura 43: Evolución del coste total de un compresor de pistón no lubricado**

También existen los compresores de velocidad variable. Su precio es aproximadamente un 20% superior al de los compresores de velocidad fija. Sin embargo, el coste de instalación se mantiene constante.

Por ejemplo, el coste total (material e instalación) de un compresor de tornillo lubricado a velocidad variable equivaldría a:

$$C = 65 \text{ €/m}^3/\text{h} \cdot 900 \text{ m}^3/\text{h} \cdot (0,55 \cdot 1,2 + 0,45) = 64.900 \text{ €}$$

## ANEXO 10: Lista de fabricantes bomba de calor y alternador trifásico

Fabricantes bombas de calor
Airwell
Alpatec
Argo
Ariston Thermo Group
Atlantic Fujitsu
Atlantic Alféa
Baxi
Beretta
Chaffoteaux
Daikin (Altherma)
Daitsu
Ferrolí
Fleck
Junkers
GRE
Hitachi
Hiyasu
Hozelock
Levante
LG Therma
MDV Spain
Mitsubishi Electric
Olimpia Splendid
Panasonic Aquarea
Samsung
Technibel
Terma
Thermor
Toshiba'Estia
Trotec
Vaillant
Viessmann
Whirlpool
Wolf

Fabricantes alternador trifásico
Bosch
Delco
Denso
Ford
Hitachi
Iskra
Lucas
Mitsubishi
Motorola
Niko
Valeo