

Lisette Piedra Durand

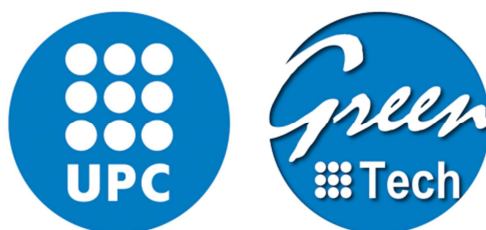
**SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN INTEGRANDO BOMBAS DE
CALOR Y ENERGÍA SOLAR TERMICA**

TESIS DOCTORAL

Dirigida por:

Dr. Jordi Cadafalch, Dr. Ricard Consul, Dr. Josep Montserrat

Grupo de Investigación de Tecnologías Renovables
GreenTech



Universidad Politécnica de Cataluña BarcelonaTech
UPC

Barcelona, Junio 2014

RESUMEN PROPUESTA

Vivimos en una sociedad en la que tenemos que hacer frente a asuntos tan graves como el calentamiento global del planeta, el efecto invernadero, la escasez y el incremento del precio de los recursos energéticos. Estos factores han hecho que el medio ambiente sea una prioridad tanto para los gobiernos, empresas y la sociedad en su conjunto. Como consecuencia, actualmente existe una tendencia creciente de la demanda de sistemas energéticos con fuente de energía renovable.

La tesis se orientará en una línea de trabajo de investigación sobre los diferentes sistemas combinados de energía solar térmica y bomba de calor para calefacción y calentamiento de agua sanitaria, conocidos en el ámbito internacional de investigación como solar heat pump (SHP).

En una primera etapa se realizará un estudio del estado del arte de esta tecnología en general. Se investigará sobre la tendencia, usos y diferentes configuraciones de estos sistemas, así como en las diferentes herramientas de diseño existentes en el mercado.

El estudio y análisis serán aplicados a las pruebas de campo de la planta real que el Grupo de Investigación en Tecnologías Renovables dispone en los espacios ubicados en el Instituto Politécnico del Campus de Terrassa. Esta planta será debidamente completada con el fin de configurar un sistema SHP y será analizada tanto del punto de vista de modelado como del punto de vista experimental. Para el modelado se utilizará el código desarrollado por el Grupo de Investigación y que forma parte del back-end de la plataforma cloud www.OmniluS.com.

Cabe señalar, que el uso de sistemas combinados de bomba de calor geotérmica y la energía solar como fuente de energía renovable, tiene un gran potencial que nos permite reducir la dependencia energética del exterior y del consumo de fuentes de energía no renovables de origen fósil.

1: TABLA DE CONTENIDO

1: TABLA DE CONTENIDO.....	3
2: OBJETIVO DE LA TESIS	4
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
2.2 OBJETIVOS CONCRETOS.....	4
3: ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	5
3.1 INSTALACIONES SHP	5
3.1.1 Introducción.....	5
3.1.2 Componentes principales	6
Bombas de calor	6
Captadores solares térmicos.....	10
3.1.3 Sistemas combinados bomba de calor y energía solar térmica.....	11
3.2 POTENCIAL TÉCNICO DE LA APLICACIÓN DE ESTA TÉCNOLOGÍA.....	15
3.2.1 Análisis costo	18
3.2.2 Análisis eficiencia.....	19
3.3 HERRAMIENTAS DE DISEÑO	21
3.3.1 Para qué sirven los programas de simulación	23
3.3.2 Comparativa software en el mercado.....	24
3.3.4 Ejemplo simulación real con TRNSYS.....	27
3.4 PROPUESTA DEL SISTEMA A ANALIZAR EN DETALLE.....	30
4: PLAN DE TRABAJO	31
5: BIBLIOGRAFÍA.....	33
6: PUBLICACIONES.....	36

2: OBJETIVO DE LA TESIS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Existe una creciente demanda de sistemas que cubran las necesidades de calefacción y agua caliente sanitaria en viviendas y en edificios del sector terciario, que lleva asociado un importante consumo de energía primaria generando como consecuencia un impacto negativo sobre el medio ambiente. Con el objetivo de reducir este impacto y dada la tendencia de escasez de fuentes de energías convencionales, es necesario el impulso del desarrollo de sistemas eficientes con fuentes energéticas renovables.

Dentro de los sistemas renovables para calefacción y agua sanitaria, recientemente está destacando el interés por los sistemas combinados de energía solar térmica y bomba de calor, conocidos como solar heat pump systems (SHP). Esto ha generado la necesidad de nuevos desarrollos, modelos de cálculo, plantas piloto y generación de estándares.

El objetivo general de esta tesis es aportar conocimiento en este campo en base al estudio del estado del arte y a la generación de nuevos resultados de modelado y experimentales que contribuyan a la consolidación de estos sistemas.

2.2 OBJETIVOS CONCRETOS

Los objetivos concretos a desarrollar se describen a continuación.

- Estudio de mercado a nivel mundial de la aplicación de sistemas combinados de energía solar térmica y bomba de calor: Potencial técnico, mejoras en eficiencia energética, análisis de herramientas de diseño, y propuesta de una configuración a analizar.
- Estudio paramétrico de la configuración a analizar, con un modelo de cálculo transitorio basado en el paquete de software OmniluS.
- Adaptación de la planta de calefacción de las oficinas del grupo GreenTech en el Instituto Politécnico del Campus de Terrassa, a las especificaciones concretas del sistema SHP analizado. Obtención de resultados experimentales.
- Análisis comparativos de resultados numéricos y experimentales.
- Conclusiones.

3: ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

3.1 INSTALACIONES SHP

3.1.1 Introducción

Debido a la elevada conciencia ambiental en cuanto al ahorro energético y el uso de las energías renovables así como sus aplicaciones en diferentes campos. La integración de sistemas combinados SHP se está empezando a aplicar en el sector terciario de los países del norte de Europa, con el fin de cubrir las necesidades de demanda de calefacción y agua caliente sanitaria.

Para evaluar y analizar la viabilidad de estos sistemas combinados desde la IEA (International Energy Agency) se creó recientemente una línea de trabajo de investigación denominada Task 44 donde participan centros I+D+I, empresas fabricantes de bombas de calor así como de paneles solares, organizaciones gubernamentales etc.. Cabe destacar que la introducción en el mercado de estos sistemas tiene una gran acogida.

Fabricantes como: Immosolar, Viessmann, Nibe, Schüco, Roth, entre otros, están incorporando en sus catálogos los sistemas de SHP

Los sistemas SHP pueden clasificarse en tres tipos en función del grado de interacción entre la parte solar del sistema y la bomba de calor.

- Sin interacción entre sistemas: el sistema solar y la bomba de calor trabajan de forma independiente y no interaccionan directamente entre ellos (sistemas de control trabajando por separado). Por ejemplo: sistema en el que la producción de ACS es con energía solar, y la parte de calefacción con bomba de calor.
- Interacción moderada: uno de los sistemas domina sobre el otro.
- Interacción e integración completa: Ambos sistemas trabajan de forma integrada e interaccionan a la vez.

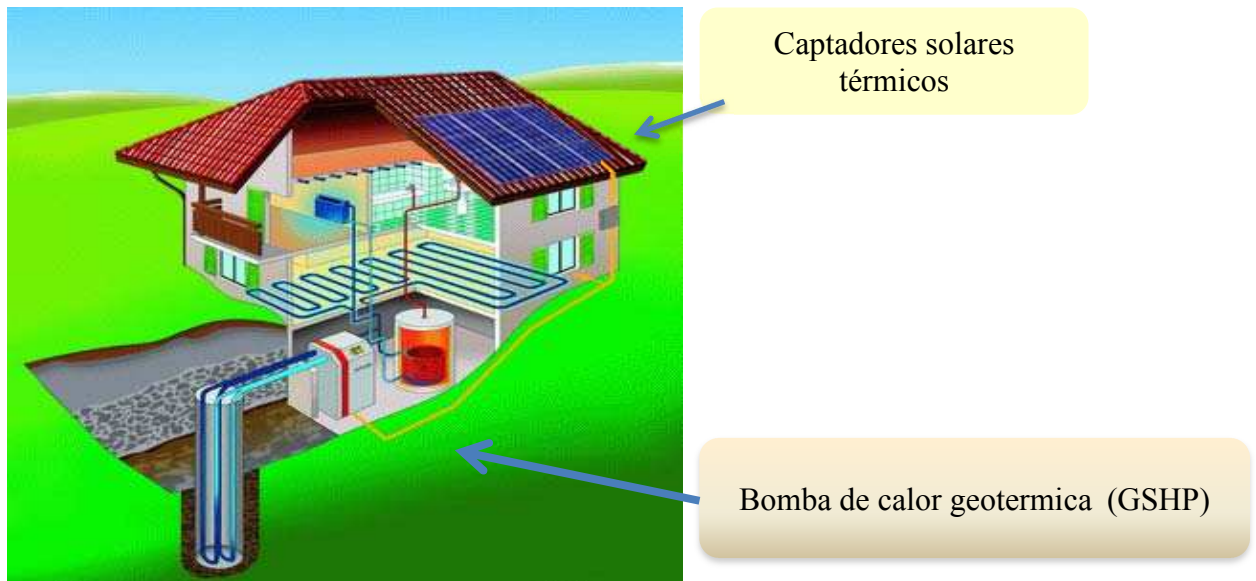


Figura 1. Esquema de una instalación de sistema combinado SHP

3.1.2 Componentes principales

Bombas de calor

Los primeros sistemas de refrigeración fueron diseñados entre los años 1850 y 1920[1]. El ingeniero Americano Jacop Perkins inventó la máquina que sería base de la actual industria de la refrigeración, obteniendo la patente en Estados Unidos descrita como “Improvements in the Apparatus and Means of Producing Ice and in Cooling Liquids” para una máquina de compresión que trabajaba en un ciclo cerrado. Ese mismo año fabricó su primera máquina, la primera unidad impulsada mecánicamente, no tuvo mucho éxito en su intento de desarrollar y comercializar su invento. Perkins, no comprendía realmente el fundamento del principio de su ciclo, 60 años más tarde Carnot publicaba su trabajo sobre la potencia motriz del calor y casi un siglo después de que Rankine propusiera su ciclo.

Fue en el año 1876 cuando el ingeniero Alemán Carl von Linden abrió camino para fabricación de refrigeradores, Carl trabajó con gases de origen natural como el amoníaco, el dióxido de azufre y el clorometano, al combinar estos gases encontró una forma de cambiarlos de fase pasándolos de estado gaseoso a líquidos y con ello crear sistemas de enfriamiento de aire.

Invirtiendo el ciclo de la máquina de refrigeración a través de un sistema de válvulas es posible utilizarla como máquina de frío y de calor, son las conocidas como bombas de calor reversibles.

En la figura 2 se muestra un esquema del funcionamiento de una bomba de calor. Los elementos principales son:

- Condensador
- Evaporador
- Compresor
- Válvula de expansión

Se trata de un circuito cerrado por el que circula un fluido refrigerante. En el evaporador se produce una absorción de calor a baja temperatura y en el condensador una cesión de calor a alta temperatura. El lado del circuito correspondiente al evaporador se le conoce como zona de aspiración o baja presión. Una vez el fluido pasa por el compresor aumenta su presión y pasa al condensador. Este lado del circuito es conocido como zona de descarga o de alta presión. El fluido a la salida del condensador está en fase líquida. Antes de volver al evaporador debe perder presión circulando a través de un elemento de expansión (la válvula de expansión).

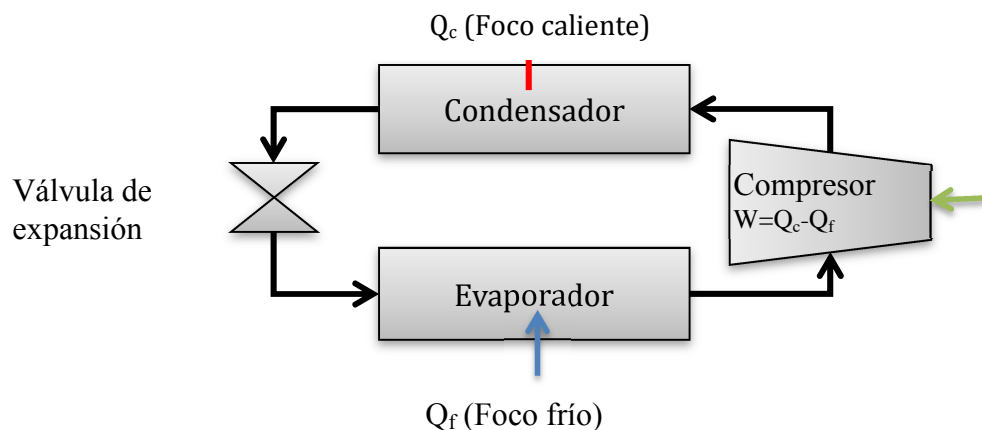


Figura 2: Bomba de calor

Las bombas de calor por compresión mecánica pueden clasificarse en función del estado y tipo de fluido con el que intercambian calor con el ambiente o suelo, ver un análisis de las bombas disponibles en el mercado en [2]:

- Aire/agua (Aerotérmicas);
- Agua/agua
- Agua glicolada/agua

El rendimiento térmico de una bomba de calor se expresa en función de la siguiente ecuación [3]:

$$\eta = \frac{Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{W}{Q_c} \quad [1-1]$$

Dónde η es el rendimiento térmico, Q_c la cantidad de energía cedida por el sistema al foco caliente, Q_f la cantidad de energía recibida por el sistema del foco frío, y W el trabajo mecánico neto del compresor.

El rendimiento de una bomba de calor para calefacción puede definirse como la relación entre calor aportada de calefacción respecto al consumo eléctrico total del compresor. Este rendimiento se conoce como el COP [4] (coefficient of performance). Este valor es dado bajo condiciones nominales de trabajo, facilitado normalmente por el fabricante de las bombas de calor.

Según su definición, el COP de calefacción se expresa como sigue

$$COP = \frac{Q_c}{P} \quad [1-2]$$

Dónde Q_c es la potencia de calefacción aportada por la bomba de calor, y P el consumo eléctrico total (que es superior a W debido a factores de rendimiento del compresor).

Las bombas de calor comerciales pueden funcionar con un COP de calefacción entre 2 y 3. En el caso que por ejemplo de que el COP sea de 2.5, esto quiere decir que cada kWh eléctrico se transforma en 2.5 kWh en calor.

El COP especifica el rendimiento instantáneo de una bomba de calor en unas condiciones específicas. Durante un año entero, las condiciones de demanda energética y del ambiente van cambiando, con lo que se hace necesario definir un coeficiente que califique el rendimiento de la bomba de calor teniendo en cuenta todos sus estados de funcionamiento. Para tal fin, se ha definido lo que se conoce como el SPF (Seasonal performance factor), o factor de rendimiento estacional. El SPF es el ratio entre la energía útil aportada por la bomba de calor durante todo su periodo de funcionamiento anual, respecto a la energía eléctrica consumida para hacerla funcionar.

$$SPF = \frac{\text{Energía útil proporcionada por la bomba de calor}}{\text{Energía consumida}} \quad [1-3]$$

Los organismos europeos especifican unos valores umbrales del SPF de un sistema con bomba de calor a partir de los cuales el sistema puede ser considerado como sistema renovable [4].

Bombas de calor Geotérmicas:

Son bombas con un elevado COP gracias a que el intercambio con el foco frío se realiza a través de un pozo geotérmico. Esto aumenta la temperatura de intercambio del evaporador acercándola más a la temperatura del condensador.

La elección del fluido que circule por el intercambiador terrestre dependerá de diferentes factores:

- Conductividad y viscosidad
- Punto de congelación
- Corrosividad, toxicidad
- Degradación
- Costes

Existen diferentes configuraciones del intercambiador terrestre. Ver las figuras 3, 4 y 5.

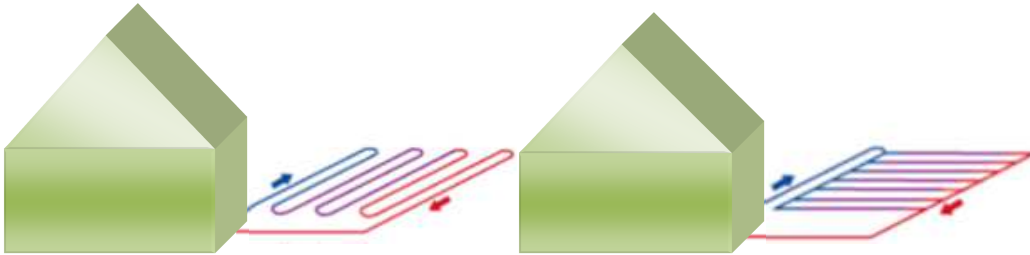


Figura 3: Intercambiador geotérmico horizontal

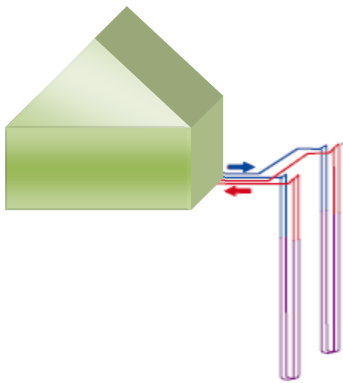


Figura 4: Intercambiador geotérmico vertical

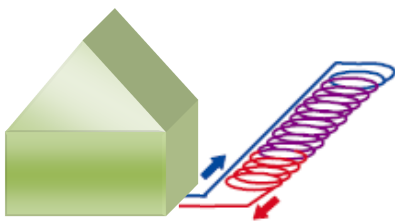


Figura 5: Intercambiador geotérmico horizontal con configuración slinky (con bucles)

Captadores solares térmicos

Este es uno de los componentes principales de los sistemas combinados para producción de ACS y calefacción.

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de tecnologías de captación solar térmica dependiendo de la temperatura de trabajo, se clasifican en 3 grupos: Captadores de baja temperatura (50-150°C), media temperatura (150-500°C) y alta temperatura (1000-3000°C). En este caso solo se considera los captadores solares de baja temperatura que son los que se utilizan para producción de agua caliente sanitaria y calefacción.

Los captadores más comunes utilizados para trabajar a baja temperatura son:

- Placa plana
- Tubos al vacío

De acuerdo con las normas UNE [5], el rendimiento para colectores solares térmicos de baja temperatura, se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_s = K(\theta) \cdot c_o - c_1 \cdot \frac{(T_{av} - T_{amb})}{G} - c_2 \cdot \frac{(T_{av} - T_{amb})^2}{G} \quad [1-7]$$

Dónde:

$K(\theta)$: Modificador del ángulo de incidencia

c_o : Factor de pérdidas ópticas cuando la irradiación solar es normal y perpendicular a la superficie de captación

c_1 : Primer factor de pérdidas térmicas

c_2 : Segundo factor de pérdidas térmicas

G: irradiación solar normal sobre superficie inclinada con

T_{av} : Temperatura media del fluido en el interior del captador;

T_{amb} : Temperatura del ambiente exterior;

Según la ecuación descrita, el rendimiento del captador queda especificado si se conocen los valores de c_o , c_1 y c_2 las condiciones ambientales como: Irradiación solar, posición solar y temperatura ambiente y las condiciones de operación como: temperatura media del fluido en el captador. Desde el punto de vista tecnológico podemos señalar que los captadores que presentan mejor rendimiento son aquellos que tienen un factor óptico $K(\theta) \cdot c_o$ elevado y unos factores de perdidas térmicas reducidos.

3.1.3 Sistemas combinados bomba de calor y energía solar térmica

Algunos sistemas combinados empezaron a ponerse en funcionamiento en la década de los años 80 motivada por la segunda crisis del petróleo. La idea de estudiar estos sistemas combinados estuvo siempre presente, tal como se demuestran en algunos casos de publicaciones, que se quedaban solo en la teoría, simulaciones, ensayos de laboratorios y pruebas de campo y que no iban a más debido a la falta de estándares o métodos que facilitarían su evaluación. A continuación se muestra un estudio de mercado de sistemas SHP [6,7,8,9,10,11,12,13]

En la figura 1.6 se puede apreciar el crecimiento de la introducción de las empresas en el mercado de los sistemas combinados

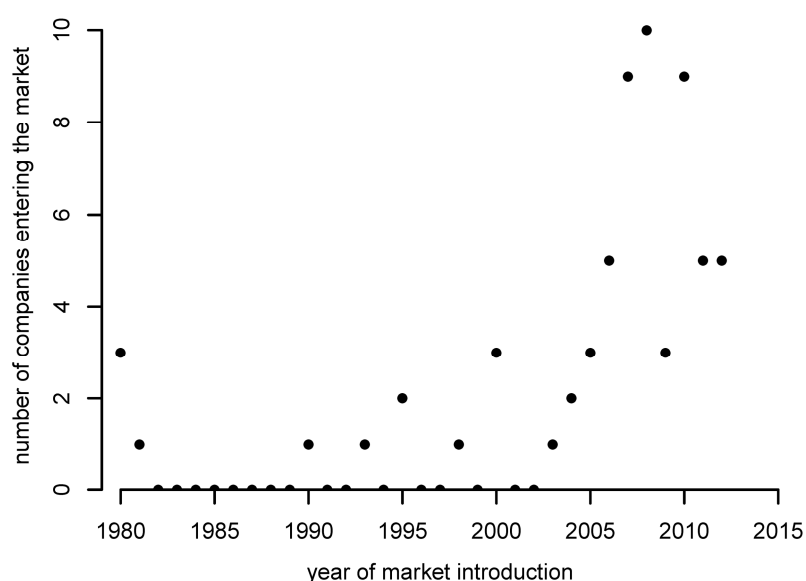


Figura 6: Empresas que entran en el mercado de los sistemas combinados por año

En la figura 7 se puede apreciar la distribución por países que trabajan con estos sistemas SHP, debido a la demanda de su mercado, siendo la que tiene más empresas activas Alemania y Austria, en una minoría países como Dinamarca, Francia, Suecia, España, etc..

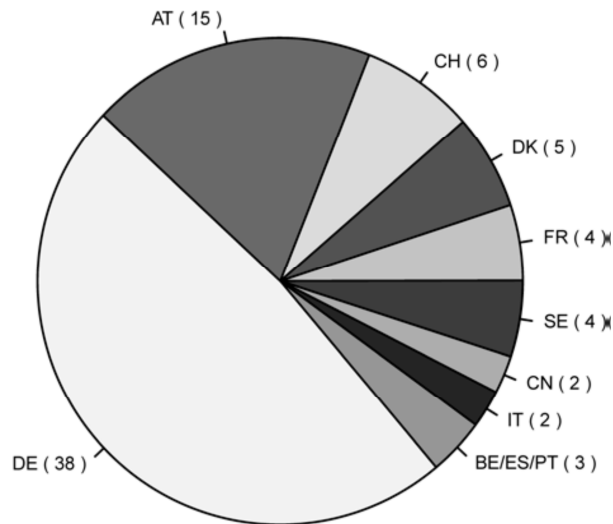


Figura 7: Empresas SHP por País

Basándonos en la información de la Task 44 subtask A [17] se ha realizado el análisis de los modelos de sistemas combinados bombas de calor y energía solar térmica, donde se puede apreciar en la figura 8b que la principal fuente de energía de estas bombas de calor es la geotermia, seguido de las bombas de calor aire agua y las bombas de calor con otro tipo de intercambio como por ejemplo

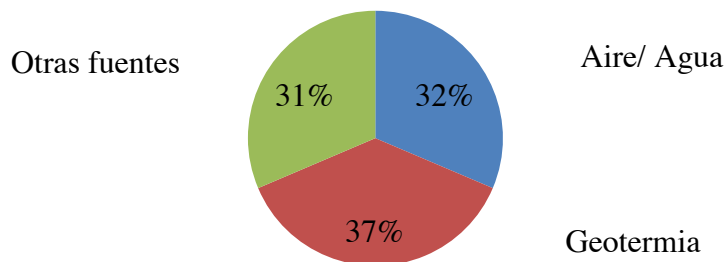


Figura 8: Fuentes de intercambio bombas de calor SHP

Uno de los parámetros importantes a comparar en los sistemas combinados es el tipo de captador solar.

En la figura 9 [10] se muestra la comparativa en el mercado Europeo de los captadores solares más utilizados

Dónde:

- FPC: captadores de placa plana
- ETC: captadores de tubo de vacío
- UGC: captadores sin cubierta
- PVT: captadores térmicos-fotovoltaicos combinados

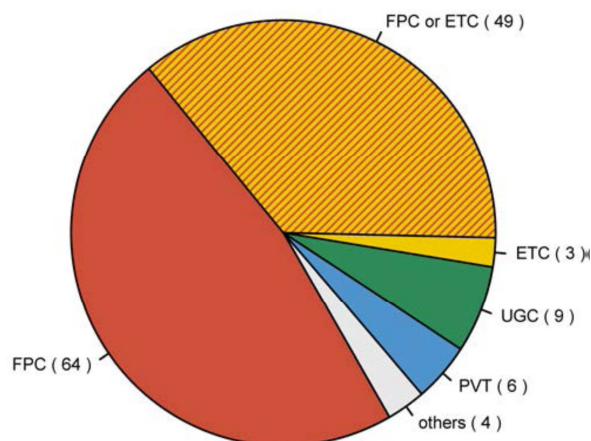


Figura 9: Captadores solares más utilizados en los sistemas SHP europeos

En la Figura 10 se presenta un análisis realizado sobre 52 casos de sistemas combinados [17]. Los captadores más utilizados son los de placas planas, o en su defecto al vacío con un 77%, los sistemas que más utilizan este tipo de captador son las bombas de calor aire/agua y los sistemas bombas de calor con geotermia agua glicolada /agua, le siguen la utilización de placas planas esmaltadas con un 13%, este tipo de captadores ha sido utilizado en los modelos que trabajan bombas de calor con sistemas especiales que se intercambian el aire con energía solar (captadores solar); el 8% de los modelos a trabajado con PVT que son captadores solares híbridos (fotovoltaica y térmica). 2% de los sistemas han utilizado captadores Helios híbridos (fotovoltaica y térmica).

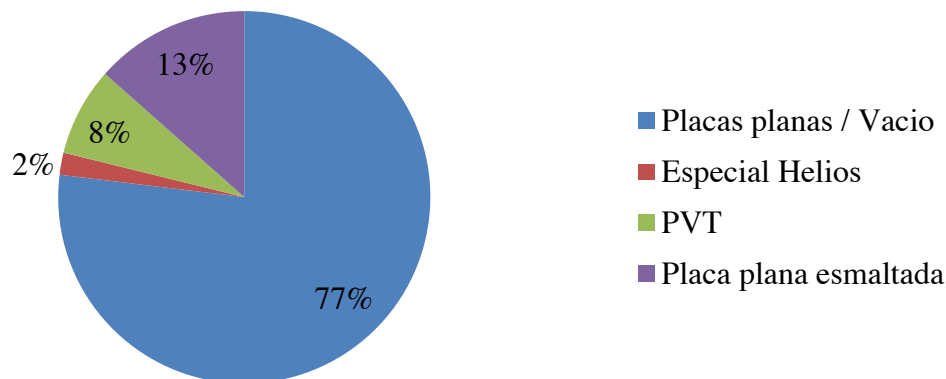


Figura 10: Captadores solares utilizados en sistemas combinados

Según se muestra en la figura 11, el 48% de la producción de ACS se genera a partir del intercambio de bombas de calor, energía solar y energía de apoyo (Backup, resistencia eléctrica, etc), 47% Producción ACS por bomba de calor y energía solar, finalmente un 5% de la producción de ACS se hace a partir de la bomba de calor que intercambia con un tanque de almacenamiento de agua glicolada.

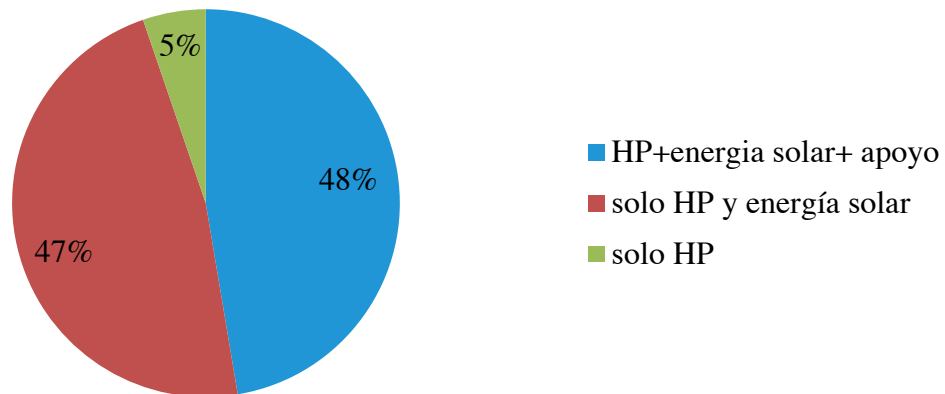


Figura 11: Producción agua caliente Sanitaria

Según se muestra en la figura 12, el 47% de la producción de suelo radiante viene dada por bomba de calor y energía solar, el 32% producción a partir de bomba de calor, suelo radiante y energía de apoyo, 16% producción a partir del intercambio directo con la bomba de calor geotérmica, 5% producción solo a partir de bomba de calor geotérmica y apoyo de energía (Backup, resistencia eléctrica).

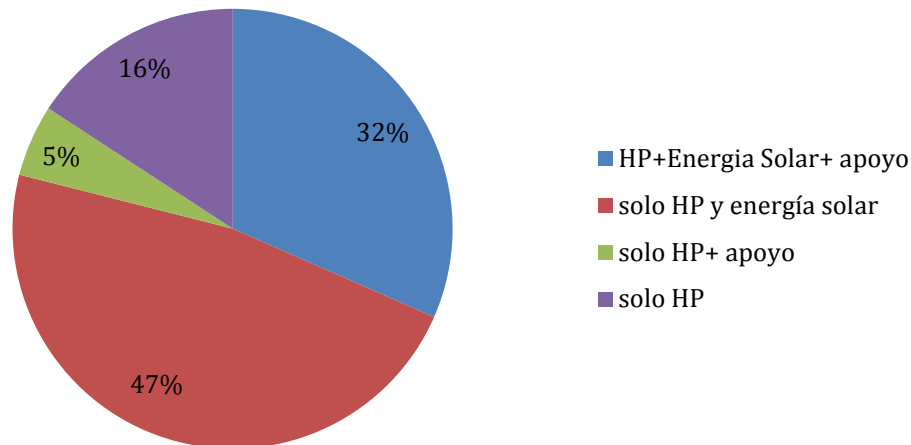


Figura 12: Producción calefacción.

3.2 POTENCIAL TÉCNICO DE LA APLICACIÓN DE ESTA TÉCNOLOGÍA

En el marco de investigación de la IEA la Task 44 [17] de la mano de fabricantes centros I+D+I y expertos en el sector han facilitado diferentes tipos de tecnologías utilizadas con sistemas combinados, como por ejemplo la figura 13 sistema combinado de bomba de calor aire/agua y paneles solares.

Se define:

- La parte superior de color verde: la energía renovable.
- El color naranja: la energía transformada, producción.
- Color azul: almacenamiento de la energía.
- Color gris: energía de la red que se puede comprar

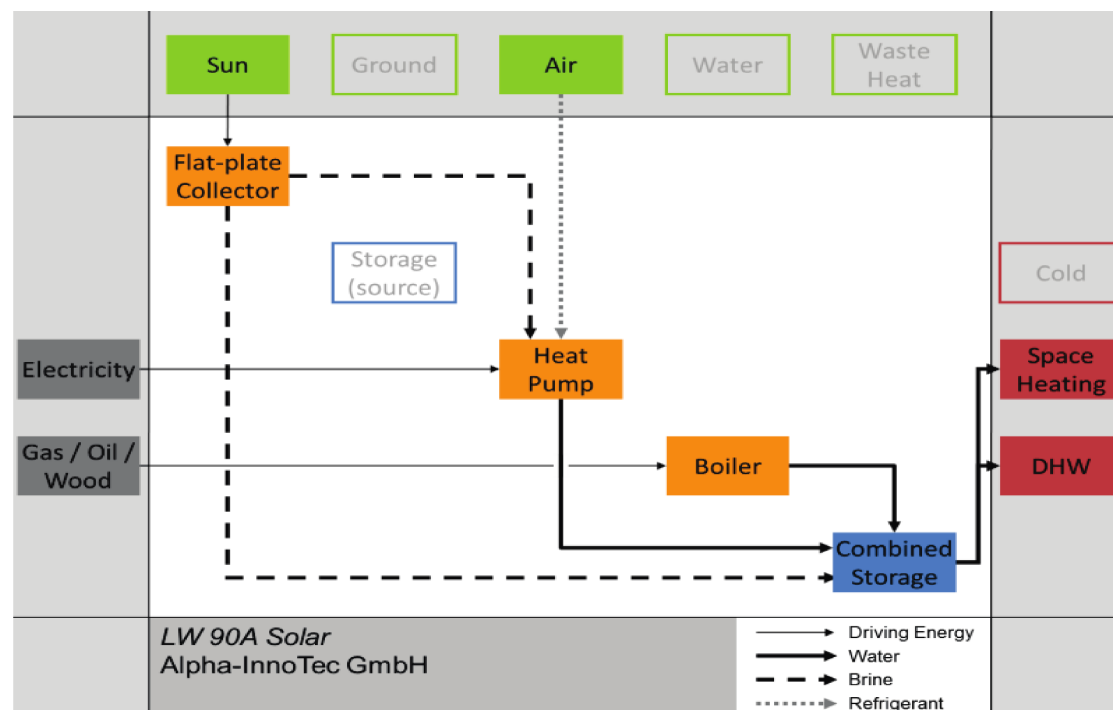


Figura 13: Sistema combinado bomba de calor Aire/agua – solar

Ejemplo de un diagrama de flujo Figura 14 con bomba de calor geotérmica y energía solar, intercambio al con el tanque combinado que distribuye al ACS y calefacción.
Sistema complejo

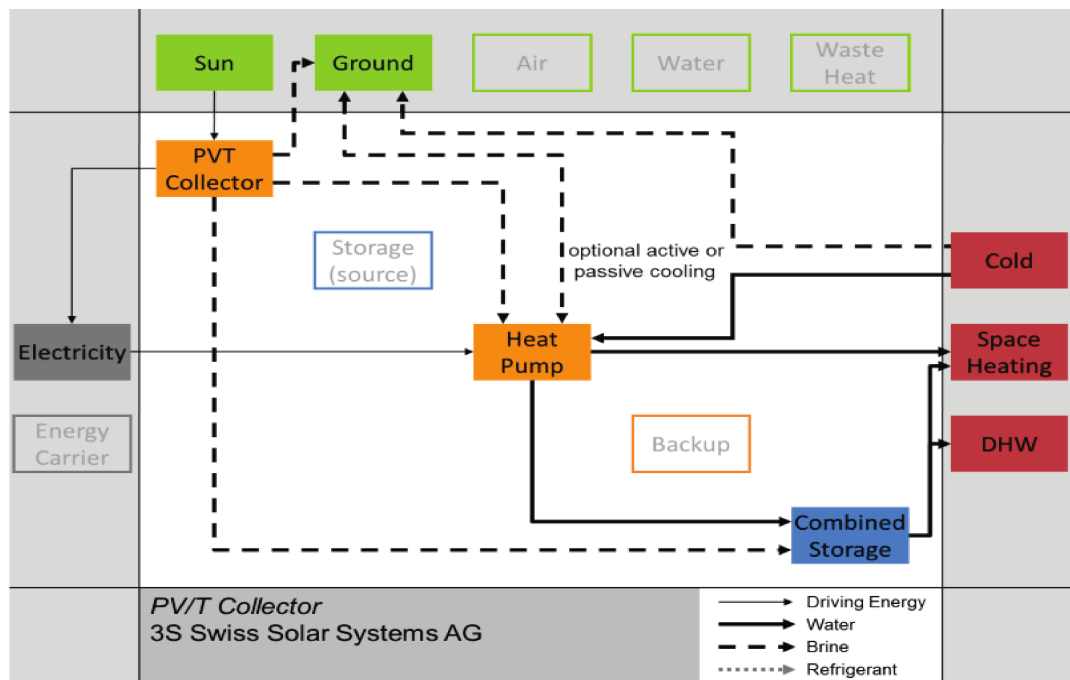


Figura 14: Sistema combinado bomba de calor Geotermia– solar

Ejemplo de diagrama de flujo figura 15 con energía solar térmica, bomba de calor intercambio especial, utiliza 2 tanques de almacenamiento y energía de apoyo para satisfacer las necesidades de calor y ACS.

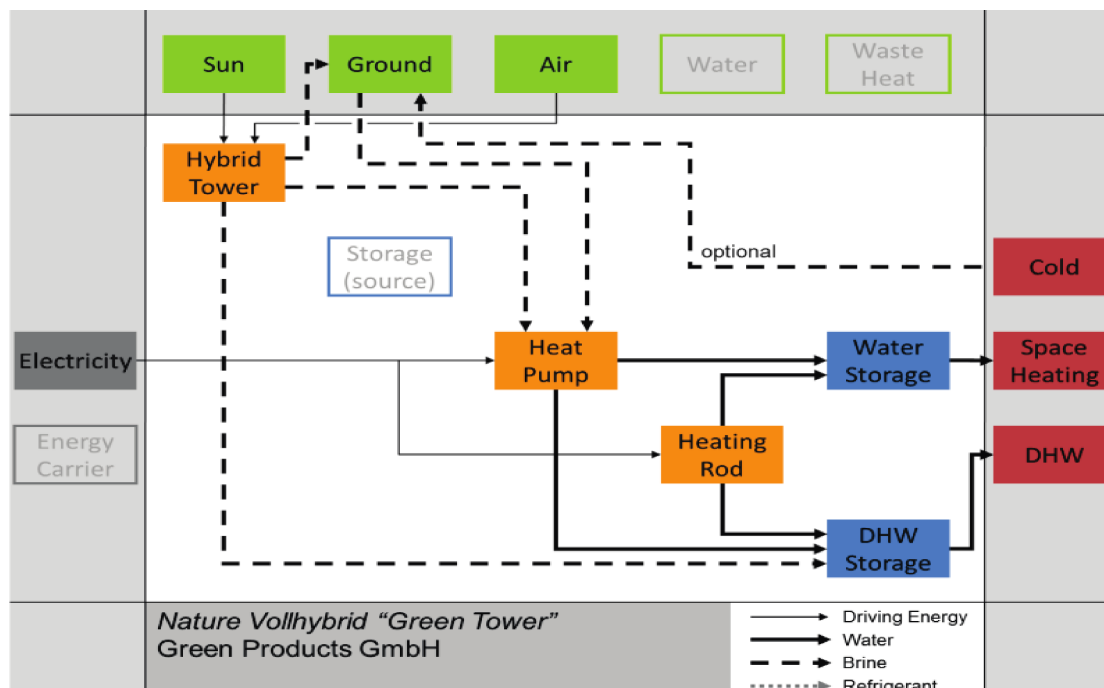


Figura 15: Sistema combinado bomba de calor geotermia /otros – solar.

Entre estos muchos otros que nos facilitan información

En la tabla 2-1 se hace referencia algunas empresas [17] que han participado activamente desarrollo de sistemas combinados y su comercialización en el mercado

<i>Organización</i>	<i>Título</i>	<i>Sistema</i>
<i>Rotex_HPSU</i>	<i>Rotex GmbH – HPSU (HeatPumpSolarUnit)</i>	<i>Solar+Hp Aerotermica</i>
<i>Daikin_Altherma</i>	<i>Daikin Europe N.V. – Altherma</i>	<i>Solar+HP Aerotermica</i>
<i>StiebelEtron_SolarSetBasic</i>	<i>STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG – Solar-Set Basic</i>	<i>Solar+HP Aerotermica</i>
<i>CBosch_solatorCelsiusSW</i>	<i>C. Bösch GmbH – Solator Celsius SW</i>	<i>Solar+HP Geotermica</i>
<i>Schueco_HPSol</i>	<i>Schüco International KG – HPSol</i>	<i>Solar+HP Geotermica</i>
<i>Wolf_SonnenheizungSW</i>	<i>Wolf GmbH – Sonnenheizung & Sole/Wasser-WP</i>	<i>Solar+HP Geotermica</i>
<i>Green Products_Greentower</i>	<i>Green Products GmbH – Nature Vollhybrid “Green Tower”</i>	<i>Solar+HP Geotermica + Torre hibrida</i>

Tabla 1: Plantas pilotos y empresas involucradas

3.2.1 Análisis costo

La bomba de calor geotérmica combinada con la energía solar térmica es una de las opciones que nos aproxima a las tecnologías de máxima eficiencia energética en instalaciones residenciales así como edificios.

Por ejemplo los costes anuales de una vivienda de 200 metros cuadrados, en el Norte de España, con 3 habitaciones y conforme al CTE (código técnico de la edificación) [18] serian para las distintas tecnologías los siguientes:

Instalación Eléctrica: 5.204 €/año

Instalación Gas Natural Condensación: 2.618 €/año

Instalación Gas Propano: 3.301 €/año

Instalación Gasóleo C: 3.384 €/año

Caldera de Pellets: 1.414 €/año

Bomba de calor geotérmica: 951 €/año

Bomba de calor Aerotérmica: 1.125 €/año

Combinación geotermia y solar: 838 €/año

La empresa Enerficaz ha realizado un estudio sobre la relación entre costes energéticos y costes de operación en España siendo menores en el caso de un sistema con bomba de calor geotérmica.

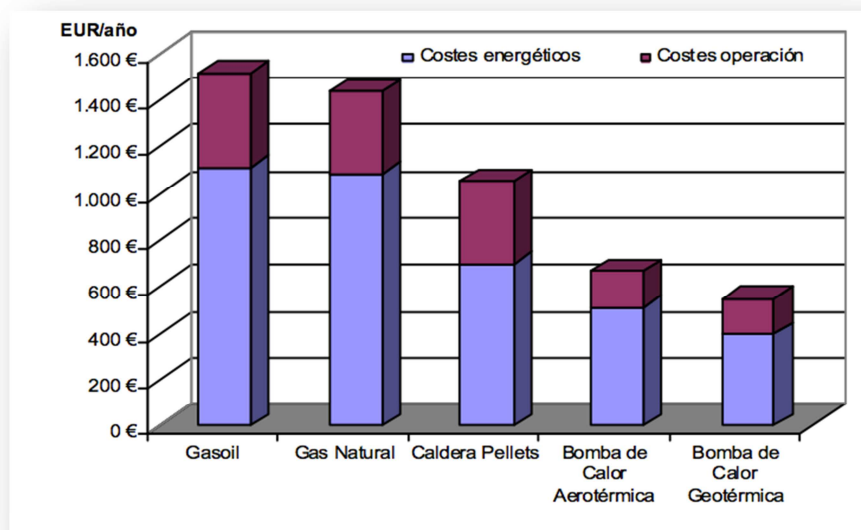


Figura 16: Comparativa costes energéticos costes operación España.

En la Tabla 2 se muestra el ejemplo de una vivienda de 200 metros cuadrados en la que el retorno de la inversión es más rápido con una bomba de calor aerotérmica mientras que una instalación con geotérmica tarda más. Valores de COP de las unidades [19] valores de retorno inversión [18]

Las consejerías de industria de las diferentes comunidades de España quieren impulsar el uso de las energías renovables y subvencionan económicamente este tipo

de instalaciones. La cuantía de la subvención dependerá de la potencia de la máquina a instalar.

Bomba de calor 8-10 kW	COP	Precios €	Retorno inversión años
Aerotérmicas	2.5-3.0	5,000	4-6
Geotérmicas+ Pozo geotérmico	4.5- 5.5	8,000+4,000 =12,000	8-10

Tabla 2: Retorno de la inversión.

3.2.2 Análisis eficiencia

Se ha realizado una comparativa entre bombas de calor geotérmicas y bombas de calor aerotérmicas.

Las bombas de calor geotérmicas tienen un COP más alto que la bomba de calor aerotérmica debido a que la temperatura del suelo siempre permanece constante durante todo el año. Las bombas de calor aerotérmicas consumen más dependiendo de la demanda por estación del año, su rendimiento baja por ejemplo en la estación estival generando un problema al no poder disipar el calor ya que la temperatura exterior es alta, en este caso se tienen que buscar soluciones y alternativas. En el caso de las bombas de calor geotérmicas no ocurre esto ya que la temperatura de la tierra permanece constante a lo largo del año.

Bomba de calor Geotérmica	Bomba de calor aerotérmica
COP más alto que la bomba de calor aerotérmica, alta eficiencia energética, siempre disponibles independientemente del clima y las estaciones	COP más bajo, su consumo energético depende del clima y las estaciones

Tabla 3: Comparativa Bombas de calor Geotérmica y Aerotérmicas.

Ejemplo de un estudio en Toronto Canadá, relaciona los costes de la instalación geotérmica (intercambiadores terrestres) con el número de colectores solares [20]

Tenemos que el valor neto actual en 20 años nos sale más a cuenta colocando un sistema con 3 paneles solares y una longitud de 188m de pozo geotérmico.

Valor neto actual a 20 años sería la suma del coste inicial total más el valor de los costes de operación en 20 años.

Captador Solar		GHLE	Análisis de costes				
Nº	Área	Longitud	Coste inicial		Coste operación		VAN (Valor neto actual) (\$) 20 años
	(m2)	(m)	Coste solar (\$)	Coste GLHE y HP (\$)	Coste anual (\$) (consumos, mantenimiento)	Valor actual (\$) 20 años	
0	0	380.0	0	19,040	2,050	23,514	42,554
0	0	220.0	0	13,760	2,330	26,721	40,481
3	6.81	188.0	851	12,702	2,334	26,723	40,278
6	13.62	172.8	1,703	12,202	2,334	26,776	40,681
9	20.43	150.0	2,554	11,450	2,337	26,804	40,807

Tabla 4: Captadores solares y longitud Pozo geotérmico.

3.3 HERRAMIENTAS DE DISEÑO

En el mercado existen diferentes tipos de softwares de simulación, estos softwares son herramientas muy útiles para ingenieros, arquitectos, etc.. Que quieren modelar un edificio, vivienda, etc.. Estas herramientas permiten determinar variables con gran precisión y ayudan a los diseñadores a tomar decisiones y optar por las mejores medidas para poder aplicarlo a cualquier tipo de edificio ya sea construido o en construcción. El objetivo básico de estos simuladores es buscar la mejor solución para el ahorro energético.

La metodología para desarrollar un código de simulación es:

- Analizar la realidad
- Investigar qué modelo matemático nos sirve para poder simular las partes y el conjunto
- Resolución numérica del modelo matemático
- A continuación se valida los resultados del modelo comparándolo con datos experimentales

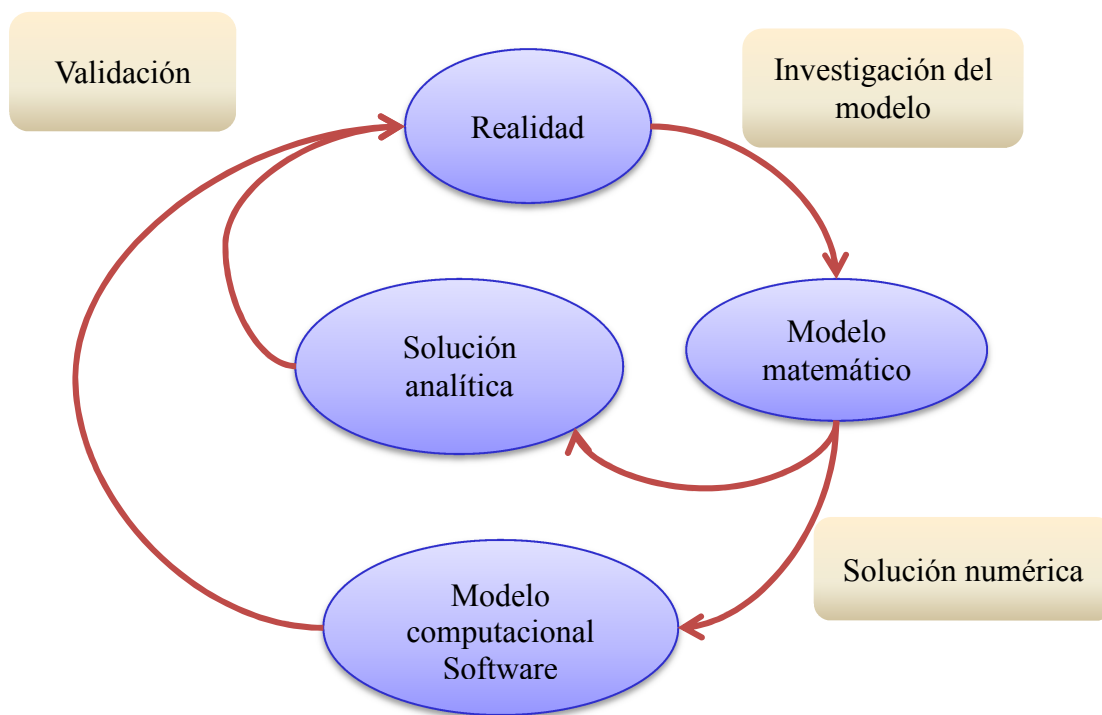


Figura 17 Esquema de metodología.

En función del grado de detalle que utiliza el modelo numérico podemos distinguir entre modelos globales y multidimensionales:

1 Globales: Estos modelos resuelven en su conjunto el balance de materia y energía de los elementos

2 Multidimensional: Es un método numérico que discretiza el elemento en 1, 2 o 3 dimensiones, como si se hiciera una radiografía por partes. Con este método se puede determinar los parámetros como la presión, temperatura, etc... en cada punto del elemento a estudiar. Se basan en volúmenes finitos, elementos finitos, elementos de contorno etc.. Un ejemplo donde se podría calcular con este método multidimensional sería un tanque de acumulación que se divide en diferentes puntos, y dependiendo de la altura del tanque nosotros podremos conocer los parámetros de temperatura, presión, etc. a la que se encuentra en determinado momento.

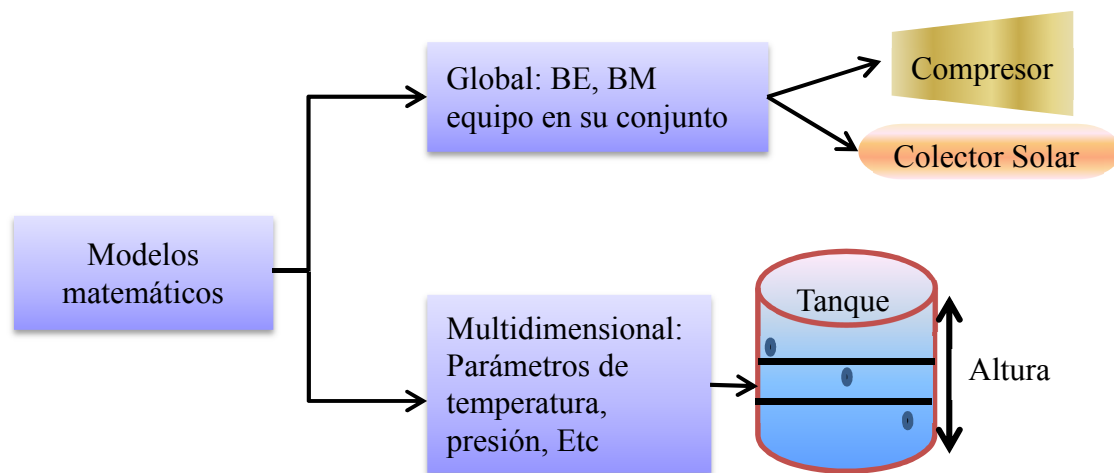


Figura 18: Modelos Matemáticos.

Hasta mediados de la década 1960 se realizaban simples cálculos a mano para estimar las necesidades energéticas en los edificios. El método grado día se utilizó para calcular las necesidades de calefacción. A partir de mediados de esta década se consiguió dividir la simulación en 3 pasos secuenciales [21]:

- 1- Cálculo de la carga térmica utilizando técnicas aproximadas.
- 2- El valor de la carga térmica es utilizada como un input de los sistemas de HVAC.
- 3- Finalmente se utilizaron los resultados del segundo paso para diseñar las máquinas de producción de energía.

Como se puede ver, no se tuvo en cuenta la interacción entre el edificio y el sistema. En la actualidad existen diferentes paquetes de software en el mercado que satisfacen las demandas de cálculos para el diseño de las instalaciones de energía solar y bombas de calor.

La importancia del uso del software radica en la capacidad que tiene de evaluar un sistema en su conjunto y no como la suma de sus componentes. La instalación de las diferentes tecnologías como los sistemas combinados en una misma instalación es cada vez más común en Europa, por esta razón la característica más importante para el software de simulación del futuro, es la capacidad de incorporar el máximo número

de tecnologías y posibilidades en un solo sistema y proporcionar el resultado del conjunto.

3.3.1 Para qué sirven los programas de simulación

Es una herramienta de ayuda que permiten dar solución a las preguntas desde la fase inicial de diseño [22]. A través de la utilización de estos softwares, los diseñadores pueden considerar opciones específicas como por ejemplo la calefacción, la refrigeración, etc.. Así mismo pueden predecir el comportamiento térmico del edificio antes de su construcción y simular los costes energéticos de edificios existentes en condiciones actuales, esto les da una visión para poder establecer la mejor medida de adaptación térmica teniendo en cuenta el consumo de energía.

Con las herramientas de simulación también se pueden calcular las siguientes variables

- Temperaturas interiores;
- Cargas térmicas de calefacción y refrigeración;
- Necesidades de los consumos de los sistemas HVAC;
- Necesidades de iluminación de los ocupantes;
- Confort interior de los habitantes;
- Niveles de ventilación, etc.

3.3.2 Comparativa software en el mercado

En este apartado se tratara de valorar la comparativa entre los diferentes softwares de simulación más extendidos a nivel mundial.

Se ha seleccionado un listado de los softwares más utilizados, la Tabla 5 [23] muestra la procedencia de los programas.

Programas	Procedencia
Energy Plus	Estadounidense, Lauwrence Berkeley National Laboratori
Esp-r	Británico Universidad Strathclyde Glasgow Escocia
IDAICE	Sueco instituto sueco de matemáticas aplicadas. Empresa EQUA
IES <VE> Integrated Environment Solutions	Britanica. Empresa IES Ltd. Alianza con google Sketchup
TRNYSYS	Estadounidense universidad de Wisconsin NREL. National Renewable Energy Laboratories
POLYSUN	Instituto de tecnología solar SPF Suiza.

Tabla 5: Programas procedencia.

Cada software de simulación energética tiene ciertas características y aplicaciones específicas [30]. Con el fin de comprenderla mejor se presenta en las tablas 6, 7 y 8 [23] señala la actuación de cada software para la simulación térmica de una instalación. En la bibliografía [21 y 23] se puede ver el alcance en más detalle sobre los diferentes parámetros que se tienen en cuenta en la simulación de un edificio, teniendo en cuenta en particular la solución de la simulación, sistemas de energía renovable, sistemas HVAC, evaluación económica.

	Energy Plus	ESP-r	IDA ICE	IES	TRNSYS	POLYSUN
Simulación soluciones						
Simulación de cargas, sistemas y soluciones	X	X	X	X	X	X
Soluciones iterativas de sistemas no lineales	X	X	X	X	X	X
Sistemas de energías renovables						
Energía solar	X	X		X	X	X
Muro trombe	X	X	X	X	X	X
Panel fotovoltaico	X	X	X	X	X	X

Tabla 6: Simulación de soluciones y sistemas de energías renovables

	Energy Plus	ESP-r	IDA ICE	IES	TRNSYS	POLYSUN
Sistemas HVAC						
Posible configuración de sistemas de HVAC	X	X	X	X	X	X
Repetición Ciclo de aire	X	X	X	X	X	X
Distribución de los sistemas	X	X	X	X	X	X
Simulación CO2			X	X	X	X
Distribución del aire por zonas	X	X	X	X	X	X
Unidad de aire forzado por zonas	X	X	X	X	X	X
Unidades equipos	X	X		X	X	X

Tabla 7: Sistemas de HVAC

	Energy Plus	ESP-r	IDA ICE	IES	TRNSYS	POLYSUN
HVAC Equipos						
Bombas de calor de absorción	X			X	X	X
Bombas de calor enfriamiento gratuito	X		X		X	X
Bomba de calor Aire/agua			X		X	X
Bomba de calor agua/agua	X		X		X	X
Evaluación económica						
Costes de energía	X	X	X	X	X	X
Costos de ciclo de vida útil de los componentes	X			X	X	X

Tabla 8: Sistemas HVAC y Balance Económico.

La mayoría de estos softwares de simulación se empezaron a programar con lenguaje FORTRAN y han ido evolucionando con un lenguaje más similar a C++ o JAVA. La mayoría de ellos te permite importar desde AUTOCAD el plano de la instalación para poder empezar la simulación, en el caso de TRNSYS y Polysun tienes la opción de dibujar el edificio teniendo en cuenta las coordenadas.

Para realizar la simulación se empieza con:

- 1- Construcción del edificio
- 2- Introducción de datos, aspectos ambientales, efectos de sombreado, el enfriamiento del sistema, las ganancias internas etc..

Para simular [24,25,26,27] la construcción del edificio definimos la orientación del mismo, **para el cálculo de la carga térmica** se empieza simulando y definiendo: el forjado del edificio, material de las paredes, ventanas, puertas, cubiertas, etc. todo lo referente al edificio físico, luego las cargas sensibles (ordenadores, iluminación, etc..) y latentes como la ocupación (número de personas, etc), Según el código técnico de edificación dependiendo del fin al que se destina el uso de la instalación (laboratorio, teatros, etc) te indica el número de renovaciones de aire a tener en cuenta. Uno de los principales factores que varía el resultado de la simulación de una instalación puede ser por ejemplo, la base de datos climáticos (grados día) con la que trabajan los programas, por ejemplo TRNSYS trabaja con la base datos de Meteonorm, los demás programas utilizan la base de datos según la norma Europea UNE-10349 [28].

Para la simulación de las **unidades de producción, en este caso los sistemas combinados de paneles solares con bomba de calor geotérmica,** los programas TRNSYS como POLYSUN ofrecen un amplio abanico de posibilidades como: Elementos hidráulicos (Bombas, válvulas, etc.) , unidades de producción de frío (Paneles solares, bombas de calor, etc..). Como se ha comentado al principio se puede hacer una simulación del conjunto de la instalación teniendo en cuenta las necesidades energéticas del edificio, los consumos de energía dependiendo por ejemplo de un determinado mes del año las horas de funcionamiento de las unidades, etc.. La robustez de los programas se miden teniendo en cuenta el tiempo que tardan en dar un resultado del cálculo de la simulación [28] .

Finalmente el programa te muestra un resultado de la simulación con vistas en 3D. Los softwares de simulación continuamente se van actualizando y sacando al mercado versiones con aplicaciones para calcular una simulación que cada vez se aproxime a la realidad

3.3.4 Ejemplo simulación real con TRNSYS

TRNSYS es una herramienta de software de simulación con una estructura modular que ha sido especialmente diseñada para desarrollar sistemas complejos relacionados con la energía describiendo el sistema en un número de componentes más pequeños [29] llamados Types que pueden ir desde el diseño de una bomba de calor simple a una definir varias zonas (zonificar) de un edificio complejo. Los componentes se configuran a través de la interface gráfica de usuario conocida como Trnsys simulation Studio. La construcción del edificio en el programa su puede hacer mediante la introducción de datos en la interfaz de visualización de imágenes conocido como TRNBuild [24].

Ejemplo de los resultados que se pueden dar con el programa, se muestra a modo de ejemplo un proyecto real de una planta piloto cerca de Frankfurt Alemania [31].se ha evaluado experimentalmente el comportamiento de los resultados de un campo de colectores PVT integrado con una bomba de calor geotérmica. La figura 3.3 se muestra el esquema hidráulico.

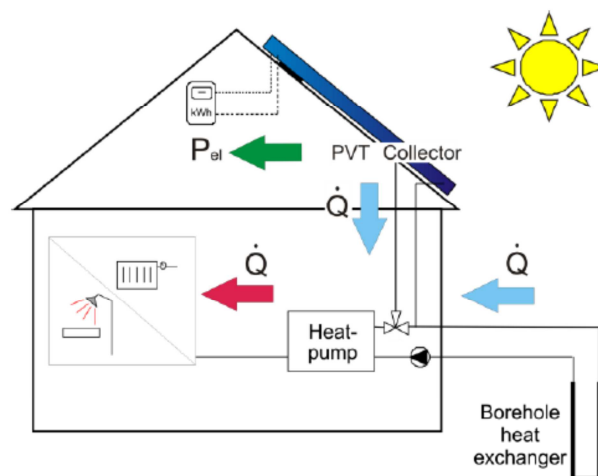


Figura 19: Sistema investigado con el colector PVT sin esmaltar con bomba de calor geotérmica.

Se trata de una instalación de 39 m^2 de colector solar PVT, 3x75 m pozo geotérmico y una bomba de calor de 12 kW.

La bomba de calor satisface la demanda de calefacción y ACS, el condensador de la bomba de calor viene integrado dentro del tanque de almacenamiento de ACS.

En este ejemplo se evalúa el rendimiento de los colectores solares y su influencia en la mejora del SPF de la instalación, a continuación los resultados que da el programa:

En la figura 20 Se puede ver que en invierno durante la demanda de calor más alta de la bomba de calor, el colector PVT cubre solo una pequeña fracción de la demanda, por el contrario es la fuente de calor que más domina durante el verano. Durante los

periodos de transición especialmente en primavera, los colectores proporcionan una fracción significativa de la demanda de calor del evaporador, aquí el PVT predomina respecto al pozo geotérmico, como consecuencia se mejora la eficiencia de la bomba de calor

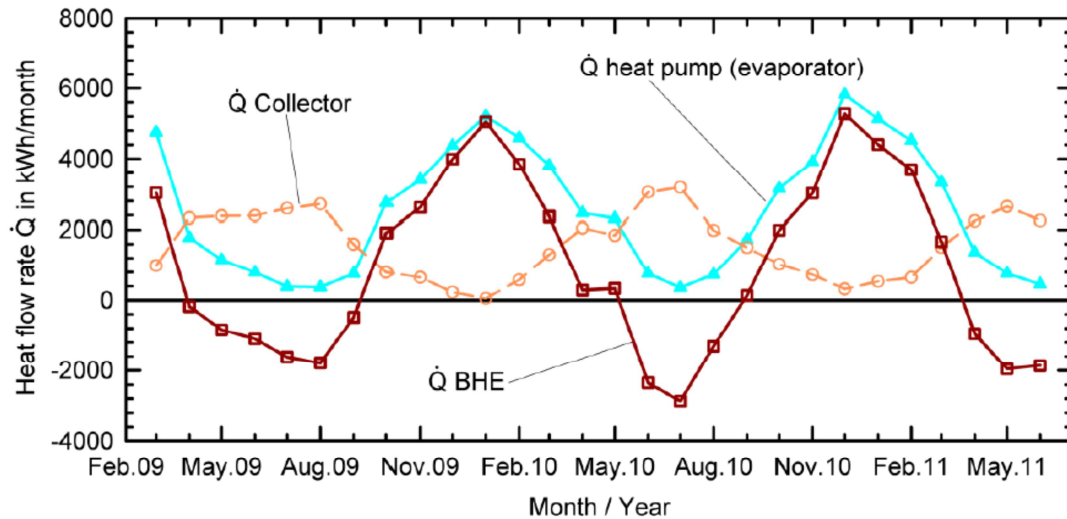


Figura 20: valores mensuales de flujos de calor provenientes de los colectores solares y la bomba de calor, el intercambiador terrestre para un periodo de 28 meses de operación.

En la figura 21 se puede ver para un periodo de simulación de 20 años, el sistema funciona mejor con el apoyo de sistemas con energía solar térmica.

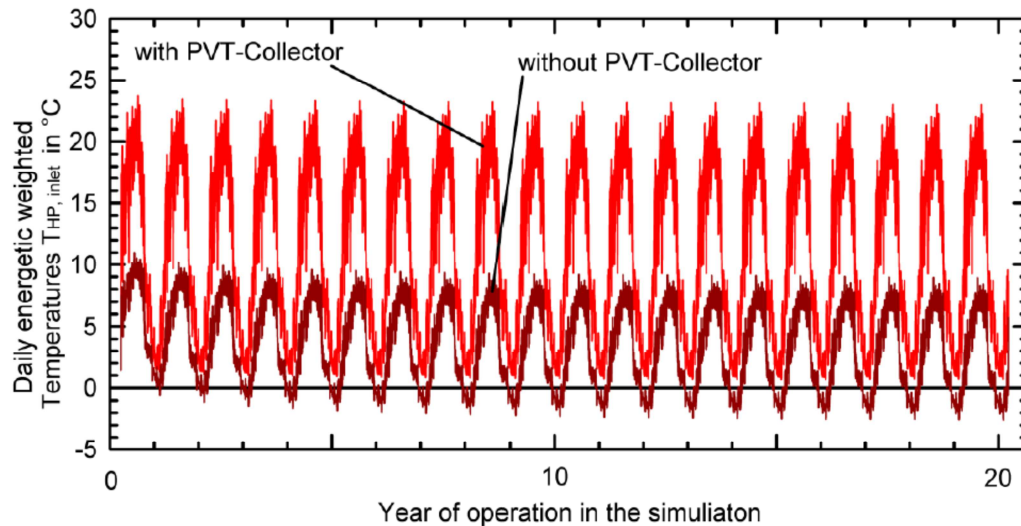


Figura 21: Simulación de temperaturas de entrada de la bomba de calor, con apoyo y sin apoyo de colectores solares para un periodo de 20 años, la base de la demandas son datos medidos tomadas del primer año.

A continuación la tabla 5 con los datos que ha utilizado el programa para realizar la simulación:

Tab. 1: Parameters for the TRNSYS simulation of the reference system

Total heat demand Q_{total} incl. DHW, storage and distribution losses	12.5 MWh/a
Heat demand of domestic hot water	2.5 MWh/a
Length of Borehole heat exchanger (+ variations)	90 m
PVT- collector size (+variations)	20 m ²
Heat conductivity of ground	2 W/mK
Type of borehole heat exchanger	Double U- tube
COP of the heat pump	4.6
35°C heat source side / 0°C heat sink side	
PVT- collector, electrical	0.12 W _p /m ²
PVT- collector, thermal (OC) for open circuit operation and 1 m/s wind speed	$\eta_0 = 0.73$; $b_1 = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$
Weather data	TRY 7, Kassel, central Germany

Tabla 9 Parámetros para la simulación.

En la figura 22 se muestra el parámetro de SPF simulado en función de la longitud del pozo geotérmico y el área de los paneles solares PVT. Los valores del área y la longitud están dados en valores absolutos que están relacionados con la demanda total de calor. El gráfico muestra:

- 1- Sistema típico de pozo geotérmico convencional.
- 2- Punto de diseño de la planta piloto según lo que se planifico.
- 3- Primer año de funcionamiento de la instalación
- 4- Segundo año de funcionamiento de la instalación

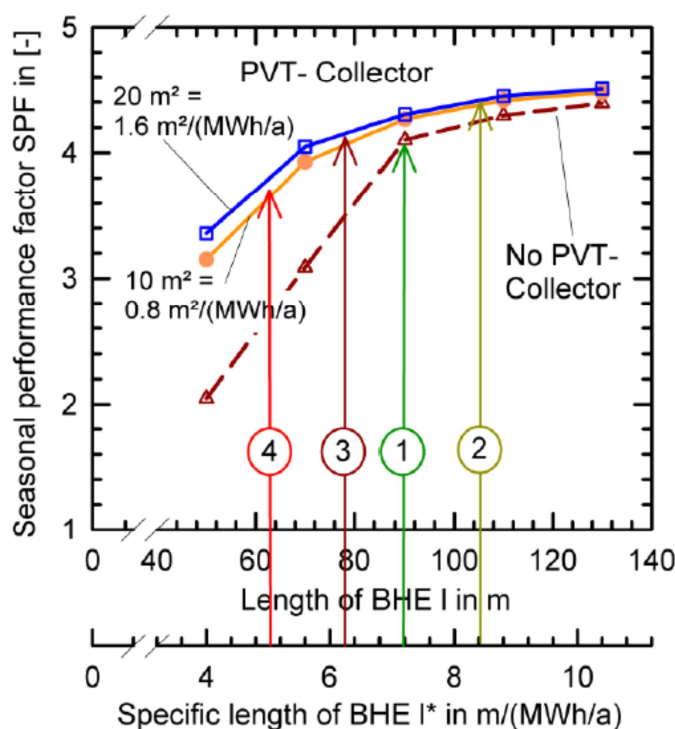


Figura 22: Seasonal performance factor SPF.

3.4 PROPUESTA DEL SISTEMA A ANALIZAR EN DETALLE

De las configuraciones que tenemos en el mercado, nosotros estudiaremos el caso de la instalación de bomba de calor y energía solar conectada en serie, sistema de máxima integración de los componentes, el tanque de acumulación es el centro principal del sistema

EL tanque de almacenamiento intercambia calor con los paneles solares y la bomba de calor geotérmica. A partir de aquí se distribuye el agua para cubrir las demandas de calefacción y ACS

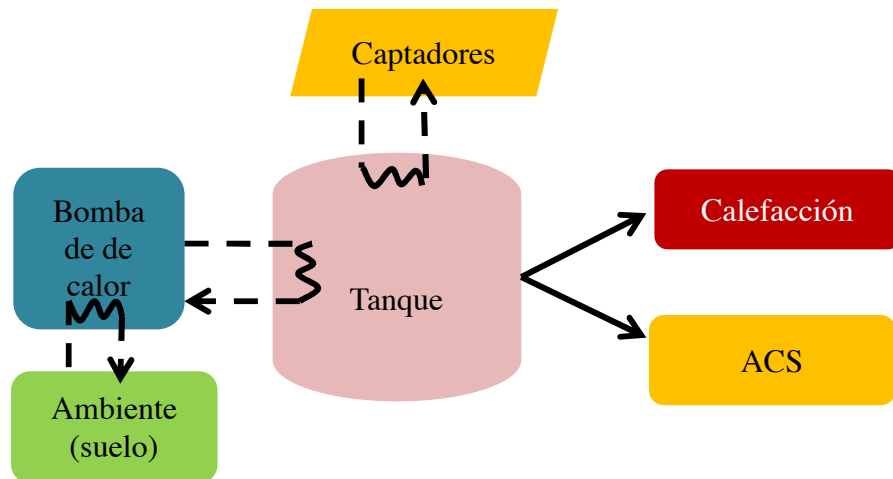


Figura 23: Configuración conexión en serie.

4: PLAN DE TRABAJO

A continuación se muestra el diagrama de Gantt con la planificación de las tareas

	2013				2014				2015			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1. Investigación												
1.1 Conocimiento												
1.2 Estado del arte												
1.3 Modelado												
1.4 Planta piloto												
2. Proyecto de tesis												
3. Result. y redacción												
3.1 Análisis												
3.2 Redactado												
4. Defensa												

Se contempla que el trabajo a desarrollar sea por un periodo de 3 años y a contar desde enero de 2013. A continuación se detallan las diferentes tareas planificadas.

TAREA 1: PERIODO DE INVESTIGACIÓN (Duración: Ene-13 a Dic-14)

Tarea 1.1 Profundizar en conocimientos teóricos (Duración:Ene-13 a Des-13)

Este periodo de trabajo incluye la profundización de los fundamentos teóricos en temas de climatización, bombas de calor y energía solar a todos los niveles como: física, modelización y experimentación, teniendo en cuenta que es una tarea a realizar durante todo el trabajo de la tesis doctoral, se especifica como periodo de desarrollo el primer año y se considera de especial relevancia.

Tarea 1.2 Análisis del estado del arte (Duración: Ene-13 a Des-13)

En paralelo y de forma complementaria que la tarea 1.1, se realizará un estudio profundo del estado del arte en el área de investigación contemplando los siguientes aspectos:

- Instalaciones a nivel mundial utilizando bombas de calor integradas con energía solar térmica.
- Potencial técnico de la tecnología: tipo de tecnología (sistemas), mejoras esperables en eficiencia energética, análisis de coste/eficiencia.
- Análisis de las herramientas de ingeniería existentes (cálculo y experimentales) disponibles para el diseño, control y mantenimiento de las instalaciones. Limitaciones y necesidades de desarrollo.
- Partiendo del análisis de los resultados de los apartados a, b y c propuesta de un sistema a analizar en detalle en las siguientes tareas.

Tarea 1.3 Modelado (Duración: Jul-13 a Des-14)

Análisis numérico paramétrico de instalaciones con la configuración especificada en la tarea 1.2. software utilizando la plataforma cloud www.omnilus.com

Tarea 1.4. Planta de demostración. Diseño y construcción (Duración: Ene-14 a Des-14)

Adaptación de la planta de climatización en las oficinas de GreenTech en el Instituto Politécnico de Terrassa.

TAREA 2: PROYECTO DE TESIS (Duración: Abr-14 a Jun-14)

Esta tarea contempla la preparación y defensa del proyecto de tesis.

TAREA 3: OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y REDACCIÓN (Duración: Nov-14 a Oct-15)

Tarea 3.1. Análisis (Duración: Nov-14 a Abr-15)

Análisis de la planta definidas en la tarea 1.2. Comparativa de resultados numéricos con resultados de medida reales

Tarea 3.2. Redacción (Duración: Ene-15 a Oct-15)

Redacción de la tesis.

TAREA 4: DEFENSA DE LA TESIS (Duración: Nov-15 a Dec-15)

Etapas final que contempla la preparación de la defensa de la tesis.

5: BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASHRAE Journal November 2004 “100 year of refrigeration”.
- [2] Fawcett, Tina. Environmental change institute, university of Oxford “*the future role of heat pumps in the domestic sector*”
- [3] Moran, Michael. , Shapiro, Howard. “Fundamentals of engineering thermodynamics, second edition”
- [4] ASHRAE Handbook, Refrigeration 320/325/330 (Organismo de certificación energética)
- [5] Notificación comunidad Europea (anexo VII de la Directiva 2009/28/CE) 1 de marzo 2013
- [6] UNE-EN 12975-2:2002 (AENOR 2002) (2)
- [7] EIA Task 44- sub task A (A Review of Market-Available Solar Thermal Heat Pump Systems) 18.03. 2013
- [8] Freeman, T L., Mitchell, J W., Audit, T E., “Performance of combined solar-heat pump systems”, Solar Energy 22 (2), 1979, 125-135
- [9] Hartmann, F., Schwarzbürger, H., „Systemtechnik für Wärmepumpen. Solar- und Umweltwärme für Wohngebäude“, Hüthig & Pflaum Verlag GmbH & Co. Fachliteratur KG, 2009, Munich/Heidelberg, Germany
- [10] Henning, H.-M., Miara, M., „Kombination Solarthermie und Wärmepumpe – Lösungsansätze, Chancen und Grenzen“, Wittwer, V. (Ed.), Proc. of the 19. Symposium Thermische Solarenergie, 2009, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut (OTTI), Bad Staffelstein, Germany
- [11] IWO Institut für Wärme und Oeltechnik, Anlagenbaubefragung 2008-2011. Solaranteile in Modernisierung plus Neubau“, 2012, Hamburg, Germany
- [12] IWU Institut Wohnen und Umwelt (Diefenbach, N., Cischinsky, H., Rodenfels, M.) and Bremer Energie Institut BEI (Clausnitzer, K.-D.), „Datenbasis Gebäudebestand – Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand“, 2010, Darmstadt, Germany
- [13] Kjellson, E., “Solar collectors combined with ground-source heat pumps in dwellings”, Ph.D. thesis, 2009, Lund University, Sweden
- [14] Müller, H., Trinkl, C., Zörner, W., „Kurzstudie Niederst- und Niedertemperaturkollektoren“, 2008, Hochschule Ingolstadt (Institut für Angewandte Forschung), Ingolstadt, Germany

- [15] Nowak, T., Murphy, P., “Outlook 2011. European Heat Pump Statistics”, 2011, The European Heat Pump Association EEIG (EHPA), Brussels, Belgium
- [16] Tepe, R., Rönnelid, M., “Solfångare och värmepump: Marknadsöversikt och preliminära simuleringsresultat”, 2002, Centrum för Solenergiforskning, Solar Energy Research Center, Högskolan Dalarna, Borlänge, Sweden
- [17] Trojek, S., Augsten, E., „Solartechnik und Wärmepumpe. Sie finden zusammen“, SonneWind & Wärme 33(6), 2009, 62-71
- [18] IEA Task 44 sub-task A
- [19] <http://www.morissarroes.es/geotermia-solar-en-vivienda-unifamiliar/>
- [20] <http://www.enerficaz.com/geotermia.pdf>
- [21] Farzin M. Rad, Alan S. Fung, Wey H. Leong Dept. of Mechanical and Industrial Engineering, Ryerson University (2009) *Eleventh International IBPSA Conference*
- [22] Jeroen Van der Veken, Dirk Saelens, Griet Verbeeck, Hugo Hens. *Comparison of Steady- State and Dynamic Building Energy Simulation.*
- [23] Joana Sousa. *Energy Simulation Software for Buildings: Review and Comparison.*
- [24] Guía técnica Procedimientos y aspectos de la simulación térmica en edificios IDEA (instituto para diversificación y ahorro de la energía – Ministerio de industria, turismo y comercio).
- [25] Drury, Crawley; Hand, Jon W.; Kummert, Michael; Griffith, Brent. Contrasting the Capabilities of Building Energy Simulation Software tools. Energy Performance Simulation Software tools, U.S. Department of Energy, Energy Systems Research Unit, University of Wisconsin-Madison, National Renewable Energy Laboratory. Version 1.0. July 2005. ENERGY PLUS
- [26] Westphal, Fernando Simon. Curso: Introdução ao Energy Plus. Universidad Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico – Departamento de Ingeniería Civil. Florianópolis. Brasil. Junho 2006.
- [27] Crawley, D.B., et al., EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy and Buildings, 2001. 33(4): p. 319-331.
- [28] Simulation and Energy Plus. General Considerations. Available from: http://pcc5746.pcc.usp.br/Textos_Tecnicos/PCC%205746%20Simula%C3%A7%C3%A3o%20EnergyPlus.PDF, website consulted 10th July 2012.
- [29] Axaopoulos, Petros. J. , Fylladitakis, Emmanouil., Gkaradis, Konstantinos., *Accuracy analysis of software for the estimation and planning of photovoltaic installations*

[30] Trnsys 17, a transient SYSTEM Simulation Software tool. Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison; TRANSSOLAR Energietechnik GmbH; CSTB –Centre Scientifique et Technique du Bâtiment; TESS – Thermal Energy Systems Specialists.

[31] Building Energy Software Tools Directory – U.S. Energy Department
http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename_menu=whole_building_analysis/pagename_submenu=energy_simulation, website consulted 10th July 2012

[32]. Bertram, Erik., Stegmann, Martin., Rockendorf , Gunter. Institute for Solar Energy Research Hameln (Germany) “ Heat pump systems with borehole heat exchanger and unglazed pvt collector septiembre 2011

6: PUBLICACIONES

[P1] R.Consul; J. Cadalfalch; L.Piedra van Dommelen; J.Montserrat; “Numerical Model for the calculation of integrated heat pump and solar thermal systems for combined heating and domestic hot water application” VII Congreso Iberico de Ciencias y Tecnologías del Frío (CYTEF), Tarragona (España), junio 2014.