

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en las Tecnologías
Industriales

Estado Actual de los Sistemas de Climatización
mediante Energía Solar.

Autor: Marta Castañeda García

Tutor: Fco. Javier Pino Lucena

**Dep. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en las Tecnologías Industriales

Estado Actual de los Sistemas de Climatización mediante Energía Solar.

Autor:

Marta Castañeda García

Tutor:

Fco. Javier Pino Lucena

Dep. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Estado Actual de los Sistemas de Climatización mediante Energía Solar.

Autor: Marta Castañeda García
Tutor: Fco. Javier Pino Lucena

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis maestros

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi tutor de este Trabajo de Fin de Grado, Fco. Javier Pino Lucena, por la gran oportunidad que me ha brindado al tutelarme en la realización de este proyecto y el trato exquisito con el que me ha recibido en cada una de mis visitas. Al Departamento de Ingeniería Energética por estos dos últimos años de enseñanza.

Resumen

Actualmente, la aceleración del cambio climático es un tema de gran importancia en el ámbito energético. Es por esto que se buscan constantemente formas y medios que reduzcan las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

Los sistemas de climatización constituyen una parte importante del consumo energético de cualquier edificio. Tanto es así que las mejoras en este sector están en constante desarrollo. Por mejoras se entiende la reducción del consumo eléctrico proveniente de fuentes fósiles, sustituyendo estas fuentes por energías renovables, tales como el Sol. El uso de estas fuentes limpias trae consigo una clara reducción de las emisiones que serían perjudiciales para la capa de ozono.

Se pueden encontrar diferentes tecnologías para afrontar este cambio, tales como los sistemas de absorción, adsorción y ruedas desecantes. Dependiendo de la zona del mundo en la que nos encontremos, estas instalaciones serán más eficientes o menos. Según los ratios analizados se puede llegar a la conclusión de que los climas más cálidos dan mejores resultados en cuanto a rendimiento.

Esta mentalidad de cambio se ha impuesto ya en casi todos los países del mundo.

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	<i>CONTENIDO Y OBJETIVOS DEL PROYECTO</i>	1
1.2.	<i>ESTADO ENERGÉTICO ACTUAL</i>	2
1.3.	<i>ENERGÍA SOLAR TÉRMICA</i>	4
2	ESTADO DEL ARTE	10
2.1.	<i>CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN</i>	11
2.1.1.	Sistemas de media y alta temperatura	12
2.1.2.	Sistemas de baja temperatura	12
2.1.3.	Comparación entre los distintos captadores	15
2.2.	<i>SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN SOLAR</i>	17
2.2.1.	Ciclos cerrados	17
I.	Sistemas de refrigeración por absorción	17
II.	Sistemas de refrigeración por adsorción	30
2.2.2.	Ciclos abiertos	34
I.	Sistemas de refrigeración por ruedas desecantes	35
3.	INSTALACIONES	46
3.1.	<i>INSTALACIONES CON ABSORCIÓN</i>	47
3.1.1.	DESERT MOUNTAIN HIGHT SCHOOL (ARIZONA)	47
3.1.2.	EDIFICIO FUNDACIÓN DE INDITEX ARTEIXO (A CORUÑA)	48
3.1.3.	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA (SEVILLA)	50
3.1.4.	HOSTPITAL MOOT (PRETORIA)	51
3.2.	<i>INSTALACIONES CON ADSORCIÓN</i>	52
3.2.1.	ALMACÉN FARMACÉUTICO, PROYECTO MEDICOOL (MURCIA)	52
3.2.2.	HOSPITAL UNIVERSITARIO DE FRIBURGO (FRIBURGO)	53
3.2.3.	RESTAURANTE EN EL ISE DE FRIBURGO (FRIBURGO)	54
3.3.	<i>INSTALACIONES CON RUEDAS DESECANTES</i>	55
3.3.1.	CÁMARA DE COMERCIO DE FRIBURGO	55
3.3.2.	EDIFICIO DE INVESTIGACIÓN EN HARTBERG	56

4. ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES	58
4.1. <i>ABSORCIÓN</i>	58
4.1.1. En función del tipo de captador	58
I. PLACA PLANA	59
I. TUBO DE VACÍO	69
4.1.2. En función del tipo de uso	74
4.2. <i>ADSORCIÓN</i>	75
4.2.1. En función del tipo de captador	75
I. PLACA PLANA	75
II. TUBO DE VACÍO	75
4.1. <i>RUEDA DESECANTE</i>	76
5. FABRICANTES	78
5.1. <i>ABSORCIÓN</i>	78
5.1.1. BROAD	81
5.1.2. Carrier	83
5.1.3. ClimateWell	84
5.1.4. Thermax	86
5.1.5. Yazaki	89
5.1.6. York	90
5.2. <i>ADSORCIÓN</i>	92
5.2.1. Invensor	93
5.2.2. MYCOM-Mayekawa	95
5.2.3. Nishiyodo	96
5.2.4. SorTech	97
5.3. <i>RUEDAS DESECANTES</i>	99
6. CONCLUSIONES	102
7. BIBLIOGRAFÍA	105
8. ANEXOS	109
<i>ANEXO 1: Lista de instalaciones</i>	<i>109</i>
A. Anexo 1.1. Instalaciones con absorción	109
B. Anexo 1.2. Instalaciones con adsorción	113
C. Anexo 1.3. Instalaciones con ruedas desecantes	114
<i>ANEXO 2: Datos técnicos de los fabricantes</i>	<i>115</i>
A. Anexo 2.1. ABSORCIÓN	115
B. Anexo 2.2. ADSORCIÓN	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Evolución de la superficie instalada en m ² en España [5].....	5
Tabla 2: Prestaciones de las máquinas bromuro de litio-agua.....	19
Tabla 3: Prestaciones de las máquinas bromuro de litio-agua.....	20
Tabla 4: Comparativa de máquinas de absorción.....	28
Tabla 5: Instalación de refrigeración solar con absorción en Arizona, EEUU.....	47
Tabla 6: Instalación de refrigeración solar con absorción en Arteixo, España.....	49
Tabla 7: Instalación de refrigeración solar con absorción en la ETSI de Sevilla, España.....	50
Tabla 8: Instalación de refrigeración solar con absorción en Pretoria, Sudáfrica	51
Tabla 9: Instalación de refrigeración solar con adsorción de un almacén farmacéutico en Murcia, España	52
Tabla 10: Instalación de refrigeración solar con adsorción del hospital universitario de Friburgo, Alemania	53
Tabla 11: Instalación de refrigeración solar con adsorción en Shangai, China.....	54
Tabla 12: Instalación de refrigeración con rueda desecante en Friburgo, Alemania	55
Tabla 13: Instalación de refrigeración solar con rueda desecante en Hartburg, Austria.....	56
Tabla 14: Correlaciones en absorción con placa plana	73
Tabla 15: Correlaciones en absorción con tubo de vacío.....	73
Tabla 16: Correlaciones en adsorción	76
Tabla 17: Principales características de los equipos de absorción analizados.....	80
Tabla 18: Características de ClimateWell 10 [32].....	86
Tabla 19: Capacidad de la gama WFC-SC y WFC-SH de Yazaki (Fuente: Absorsistem).....	90
Tabla 20: Principales características de los equipos de adsorción analizados.....	93
Tabla 21: Clasificación de la serie ADCM1 de Nishiyodo [38]	96
Tabla 22: Compañías fabricantes de sistemas de refrigeración con rueda desecante	99
Tabla 23: Rango de potencias de las máquinas de ruedas desecantes de Advantix [40].....	100
Tabla 24: Lista de instalaciones con absorción	109
Tabla 25: Lista de instalaciones con adsorción	113
Tabla 26: Lista de instalaciones con rueda desecante	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Consumo energético en una vivienda	3
Figura 2: Demanda energética de frío [3]	3
Figura 3: Mapa de distribución de las zonas climáticas en España [4].....	5
Figura 4: Esquema de los procesos de refrigeración solar	10
Figura 5: Esquema básico de una instalación solar de baja temperatura con aplicación de ACS [6].....	11
Figura 6: Sección de un captador solar plano [8]	13
Figura 7: Esquema de un tubo de vacío [9]	14
Figura 8: Curva rendimiento de captadores [10].....	16
Figura 9: Procesos de conversión de energía en la refrigeración solar [11]	17
Figura 10: Esquema de una instalación de refrigeración con absorción [12].....	18
Figura 11: Refrigeración solar por absorción de simple efecto [13].....	21
Figura 12: Esquema de una enfriadora de absorción [12]	22
Figura 13: Esquema de principio de una máquina de absorción de doble efecto [13].....	26
Figura 14: Máquina de absorción de doble efecto [15].....	27
Figura 15: Comparación de las máquinas de absorción según COP y temperatura de activación. [10]	29
Figura 16: Esquema de un sistema de refrigeración por adsorción.....	31
Figura 17: Esquema de una enfriadora por adsorción [12].....	31
Figura 18: Esquema de una máquina de adsorción con 3 cámaras adsorbentes y 2 evaporadores. [17].....	33
Figura 19: Ciclo de refrigeración con ruedas desecantes [18].....	35
Figura 20: Diagrama psicrométrico [18].....	36
Figura 21: Esquema de rueda desecante [20]	38
Figura 22: Proceso de deshumidificación y regeneración de desecante (Fuente: M. Mujahid et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews 45).....	39
Figura 23: Recuperador rotativo (Fuente: Instalaciones y eficiencia energetica.com)	41
Figura 24: Enfriador evaporativo directo (Fuente: wecorhvac.com)	41
Figura 25: Enfriador evaporativo indirecto (Fuente: wescorhvac.com)	42
Figura 26: Enfriador evaporativo indirecto/directo (Fuente: wescorhvac).....	43
Figura 27: Calentador alimentado por energía solar [25]	44
Además, se sabe que la tecnología de absorción es la más usada, tal y como se ve en la <i>Figura 28</i> . En este caso se ha conseguido agrupar más de 90 instalaciones que usan absorción, frente a las menos de 10 que recurren a la adsorción o ruedas desecantes. Estas se pueden ver en los <i>Anexos 1.1, 1.2 y 1.3</i>	46

Figura 29: Distribución de las diferentes tecnologías	46
Figura 30: Vista de la superficie de captación del colegio Desert Mountain en Arizona [27].....	48
Figura 31: Vista de la superficie de captación del edificio fundación Inditex en Arteixo [27].....	49
Figura 32: Vista de la superficie de captación de la ETSI, Sevilla [28]	50
Figura 33: Mapa de Europa climático [29].....	61
Figura 34: Orden de magnitud de la capacidad de enfriadoras de absorción (Lista no exhaustiva)[10].....	79
Figura 35: Máquina de absorción de la serie BDH de Broad [30].....	82
Figura 36: Máquina de absorción de la serie BS de Broad. [30]	82
Figura 37: Máquina de absorción de la serie 16LJ de Carrier [31].....	83
Figura 38: Máquina de absorción de la serie 16TJ de Carrier [31].....	84
Figura 39: Máquina de absorción ClimateWell 10 [32].....	85
Figura 40: Máquina de absorción de la serie LT de Thermax [33].....	87
Figura 41: Máquina de absorción de la serie 5G de Thermax [33].....	88
Figura 42: Máquina de absorción de la serie HS de Thermax [33]	88
Figura 43: Máquina de absorción de la serie WFC S de Yazaki [34]	90
Figura 44: Máquina de absorción de la serie YPC-ST de York [35].....	91
Figura 45: Máquina de absorción de la serie YIA de York [35].....	92
Figura 46: Capacidad de enfriadoras de adsorción [10]	93
Figura 47: Máquina de adsorción LTC 10 plus de Invensor [36].....	94
Figura 48: Máquina de adsorción de la serie AdRef-Noa de Mayekawa [37].....	96
Figura 49: Máquina de adsorción de la serie ADCM1 de Nishiyodo [38].....	97
Figura 50: Máquina de adsorción de SorTech [39].....	98
Figura 51: Sistema de refrigeración con rueda desecante de la serie DH de Advantix [40].....	100
Figura 52: Datos característicos de los modelos BH de Broad [30].....	115
Figura 53: Datos característicos de la serie BDH de Broad [30]	115
Figura 54: Datos característicos de la serie BS de Broad [30].....	115
Figura 55: Datos característicos de la serie BS de Broad [30].....	115
Figura 56: Datos técnicos de la serie 16LJ de Carrier [31]	116
Figura 57: Datos técnicos de la serie 16TJ de Carrier [31]	116
Figura 58: Datos técnicos de la serie LT de Thermax [32]	117
Figura 59: Datos técnicos de la serie 5G (I) de Thermax [32].....	117
Figura 60: Datos técnicos de la serie 5G (II) de Thermax [32].....	118
Figura 61: Datos técnicos de la serie YPC de Yazaki [33].....	118
Figura 62: Datos técnicos de la serie YIA de Yazaki [33]	118
Figura 63: Datos técnicos de la serie LTC de Invensor [36].....	119
Figura 64: Datos técnicos de la serie LTC de Invensor [36].....	119
Figura 65: Datos técnicos de la serie AdRef-Noa de Mayakawa [37]	119

Figura 66: Datos técnicos de la serie ADCM1-180 de Nishiyodo [37].....	120
Figura 67: Datos técnicos de la serie DH (small) de Advantix [40]	120
Figura 68: Datos técnicos de la serie DH (large) de Advantix (Fuente: Advantix)	121
Figura 69: Datos técnicos de la serie DB de Advantix (Fuente: Advantix).....	121

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distribución de las instalaciones de absorción según el tipo de captador.....	58
Gráfico 2: Ratio $m2/kW$ global con placa plana	59
Gráfico 3: Ratio $m2/kW$ global con placa plana con superficies de hasta 600 $m2$	60
Gráfico 4: Ratio $m2/kW$ con placa plana en clima mediterráneo	62
Gráfico 5: Ratio $m2/kW$ con placa plana en clima mediterráneo con áreas de captación menores de 800 $m2$	62
Gráfico 6: Ratio $m2/kW$ con placa plana en clima oceánico	63
Gráfico 7: Ratio $m3/kW$ con placa plana en clima oceánico con áreas de captación menores de 400 $m2$	63
Gráfico 8: Ratio $m3/kW$ global con placa plana	64
Gráfico 9: Ratio $m3/kW$ global con placa plana y volumen menor de 40 $m3$	64
Gráfico 10: Ratio $m3/kW$ con placa plana en clima Mediterráneo.....	65
Gráfico 11: Ratio $m3/kW$ con placa plana en clima Mediterráneo con volumen de hasta 30 $m3$	65
Gráfico 12: Ratio $m3/kW$ con placa plana en clima Oceánico	66
Gráfico 13: Ratio $m3/kW$ con placa plana en clima Oceánico para volúmenes reducidos.....	66
Gráfico 14: Ratio $m2/m3$ global con placa plana	67
Gráfico 15: Ratio $m2/m3$ con placa plana ampliado	67
Gráfico 16: Ratio $m2/m3$ con placa plana en clima Mediterráneo	68
Gráfico 17: Ratio $m2/m3$ con placa plana en clima Oceánico.....	68
Gráfico 18: Ratio $m2/kW$ global con tubo de vacío.....	69
Gráfico 19: Ratio $m2/kW$ con tubo de vacío en clima Mediterráneo	69
Gráfico 20: Ratio $m2/kW$ con tubo de vacío en clima Oceánico.....	70
Gráfico 21: Ratio $m3/kW$ global con tubo de vacío.....	70
Gráfico 22: Ratio $m3/kW$ con tubo de vacío en clima Mediterráneo	71
Gráfico 23: Ratio $m3/kW$ con tubo de vacío en clima Oceánico.....	71
Gráfico 24: Ratio $m2/m3$ global con tubo de vacío.....	72
Gráfico 25: Ratio $m2/m3$ con tubo de vacío en clima Mediterráneo	72
Gráfico 26: Ratio $m2/m3$ con tubo de vacío en clima Oceánico	73
Gráfico 27: Distribución de las instalaciones de absorción según su uso.....	74
Gráfico 28: Ratio $m2/kW$ con placa plana.....	75
Gráfico 29: Ratio $m2/kW$ con tubo de vacío	75

1 INTRODUCCIÓN

En el primer capítulo se comenzará haciendo una breve introducción sobre el contenido y el alcance del proyecto, para generar una visión global de lo que se pretende conseguir con la realización de este trabajo. A continuación, se realizará una contextualización de la situación original y actual del sector energético y de climatización, con su posterior situación de mejora gracias a la energía solar térmica.

1.1. CONTENIDO Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

El principal objetivo de este proyecto es la presentación de los modelos alternativos, y sostenibles, existentes para los sistemas de climatización. Se destacan principalmente tres modelos alternativos a los sistemas convencionales de refrigeración, con los que se espera poder sustituir estos sistemas menos sostenibles a medio o largo plazo.

La estructura que seguirá el proyecto se apoya en cuatro capítulos principales:

En primer lugar se encuentra el bloque de “*Introducción*”, en el cual se pretende proporcionar una visión global del estado en el que se encuentra el sector de la climatización, englobando las distintas tecnologías y posibles mejoras, además de los inconvenientes o problemática que lleva a buscar soluciones más sostenibles para este sector.

El grueso del proyecto se encuentra en el segundo apartado, que trata sobre el “*Estado del arte de la climatización por energía solar*” en el que se desarrollan con profundidad, dentro del alcance del trabajo, las diferentes tecnologías y alternativas que aprovechan la energía solar para la producción de frío. Se describen también los principales componentes que hacen posible el aprovechamiento de esta energía renovable, tales como los captadores solares. Se centrará la atención en los sistemas de energía solar térmica de baja temperatura, pues son los idóneos para la refrigeración solar.

Se mencionarán después algunas de las instalaciones de refrigeración solar que se pueden encontrar por todo el mundo, de cada una de las tecnologías posibles. Tras haber agrupado un gran número de instalaciones que recurren a la radiación solar como principal fuente de calor, se hará un análisis con la obtención de unos ratios informativos, distinguiendo varios casos.

Por último se hablará de la situación que ocupan estos sistemas en el mercado actual, analizando las empresas encargadas de fabricar los distintos equipos y componentes que hacen posible cada tecnología.

1.2. ESTADO ENERGÉTICO ACTUAL

Hoy en día, aproximadamente el 80% del consumo energético proviene de combustibles fósiles. Esta es la razón por la que han surgido acciones legislativas e investigadoras, encaminadas a la utilización de sistemas que permitan un ahorro de energía a través del uso de las energías renovables. Sería conveniente concienciar a la sociedad del uso de tipo de tecnología para así poder incrementar la calidad de vida y minimizar los costes de producción energética, además del impacto ambiental. [1]

Los sistemas de refrigeración suponen un componente importante en el gasto energético tanto en hogares, como en sectores industriales. El incremento medio del consumo de electricidad en los últimos 5 años ha sido del 8.6%, incluyendo la demanda de aire acondicionado. Por este motivo, en los últimos 30 años, y en particular en la última década, los esfuerzos en investigación se han centrado en el desarrollo de sistemas de aire acondicionado que respetan el medio ambiente, basados en la innovación tecnológica que utiliza energía solar.

La distribución del consumo de energía en un a vivienda, según un estudio realizado por [2], es de la siguiente forma:

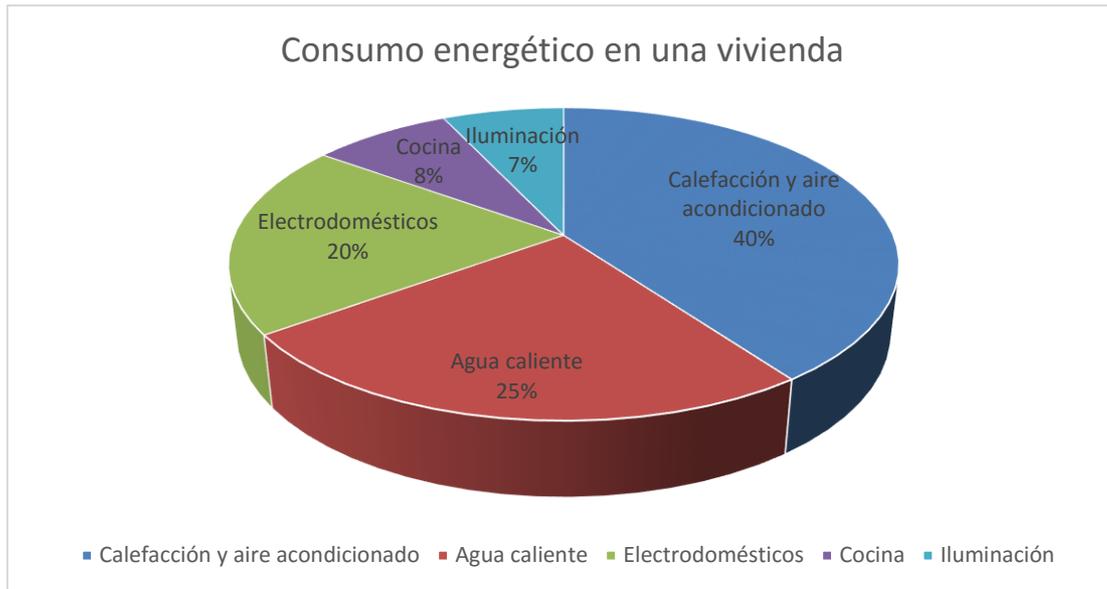


Figura 1: Consumo energético en una vivienda

Asimismo, cada vez existe una mayor concienciación sobre los problemas climáticos. El uso de las fuentes de energías no renovables, el aumento de las emisiones de gases contaminantes, la mayor demanda de energía eléctrica, y el uso de algunos tipos de refrigerantes que pueden llegar a ser perjudiciales para el medio ambiente, están cada vez peor considerados.

Por ello el uso de los sistemas de absorción, adsorción o ruedas desecantes en la climatización puede considerarse como una solución a este problema, ya que minimizan el consumo eléctrico respecto a los sistemas convencionales y se produce una clara coincidencia entre la máxima demanda energética de frío y la máxima captación de energía solar, como puede verse en la *Figura 2*. Además se reducen las emisiones de CO_2 y el consumo de energía primaria.

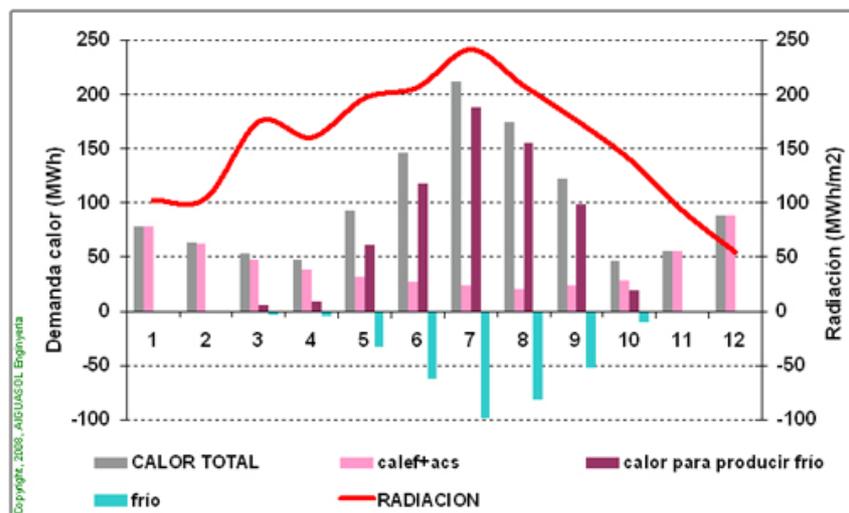


Figura 2: Demanda energética de frío [3]

1.3. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía del sol para obtención de energía térmica, mediante el calentamiento de un fluido que, por lo general, suele ser agua, o aceite. La capacidad de transformar los rayos solares en calor es, precisamente, el principio elemental en el que se basa esta fuente de energía renovable.

El principio elemental en el que se fundamenta cualquier instalación solar térmica es el aprovechamiento de la radiación solar mediante un conjunto de captadores y su posterior transferencia a un sistema de almacenamiento, que abastece el consumo cuando sea necesario.

Para cubrir por completo la demanda energética, incluso en los periodos en los que no hay suficiente radiación y/o el consumo es superior a lo previsto, casi la totalidad de los sistemas de energía solar térmica cuentan con un aporte de energía extraordinario.

La radiación procedente del Sol es la fuente de energía más abundante y limpia a disposición de los seres humanos. Sin embargo, su dispersión y discontinuidad dificultan notablemente su aprovechamiento, lo que la sitúa en desventaja en relación a otros tipos de fuentes energéticas. Esto es debido a que la cantidad de radiación solar que se recibe en cada momento depende de aspectos fundamentales como son la hora del día, la estación del año y muy especialmente de las condiciones atmosféricas. Esto es, que en los días nublados disminuirá considerablemente la intensidad de la radiación en comparación con un día soleado, estando en la misma estación del año, y en consecuencia disminuirá el aporte energético.

Para la Unión Europea, que tiene una fuerte dependencia energética, es sumamente importante aumentar progresivamente el grado de autoabastecimiento energético, y será posible con la implantación progresiva de energías sostenibles e inagotables.

En el caso de España se cumplen todos los requisitos necesarios para ser uno de los países europeos con mayor capacidad para aprovechar la energía procedente del Sol. Su situación geográfica es privilegiada, lo que hace que el clima sea idóneo para esta tecnología, teniendo escasos días en los que el cielo esté nublado por completo.

Es por eso, que posee un gran potencial de desarrollo de energía solar térmica, con una media de 2 500 horas de sol aseguradas al año. La poca nubosidad, la baja humedad ambiental, el clima seco y la incidencia de rayos solares, convierten a España en un país con un valor elevado de radiación directa procedente del Sol.

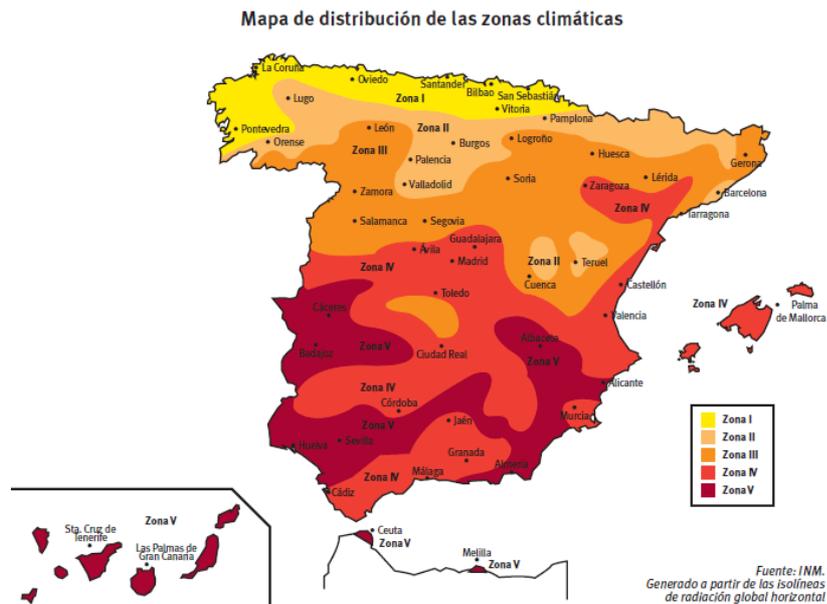


Figura 3: Mapa de distribución de las zonas climáticas en España [4]

A continuación se muestra una recopilación de la evolución de la superficie de instalaciones solares instaladas en España en los últimos años:

Año	Instalaciones Mixtas	Solar Baja Temperatura	Térmica	TOTAL (m ²)
2000	65	41 470		41 532
2001	50	55 401		55 451
2002	10	61 950		61 960
2003	127	78 979		79 106
2004	340	86 139		86 479
2005	32	106 752		106 784
2006	100	153 786		153 886
2007	280	250 408		250 687
2008	326	417 911		418 238
2009	601	392 883		393 483
2010	991	363 661		364 652
2011	412	256 889		257 301
2012	247	227 408		227 656
2013	40	232 856		232 896
2014	44	253 863		253 907

Tabla 1: Evolución de la superficie instalada en m² en España [5]

Según el mismo informe de *IDAE*, durante el año 2000 la superficie de captadores solares térmicos instalada anualmente no dejó de incrementarse hasta el 2008, año en el cual se instalaron un total cerca de 418 mil metros cuadrados (418 000 m²). Entre ese año y 2012, el mercado ralentizó su ritmo de crecimiento como consecuencia de la crisis económica e inmobiliaria. En 2013 el sector mostró indicios de retomar una senda de mayor crecimiento, que se ha confirmado en 2014 con la instalación de 254 000 m², retornando a los niveles de superficie instalada anual en el año 2011.

Las instalaciones mixtas son instalaciones fotovoltaicas junto con otra energía renovable, como es la eólica, que se abastecen también de la red eléctrica convencional, y recurren a la energía almacenada en las baterías por la fuente renovable cuando se produce un paro en la red.

El sector sigue mostrando capacidad de innovación tecnológica, con nuevos desarrollos que van desde captadores de baja temperatura, pasando por captadores planos de ultra vacío, de concentración Fresnel y micro cilindro-parabólicos, hasta sistemas de vaciado automático para grandes instalaciones (Drain Back). Como retos de futuro, cabe mencionar el fomento en el sector industrial de aplicaciones de media y alta temperatura con concentración y la oferta de servicios de climatización.

2 ESTADO DEL ARTE

Comenzaremos con un breve esquema en el que se muestra la jerarquía de los procesos de refrigeración solar.

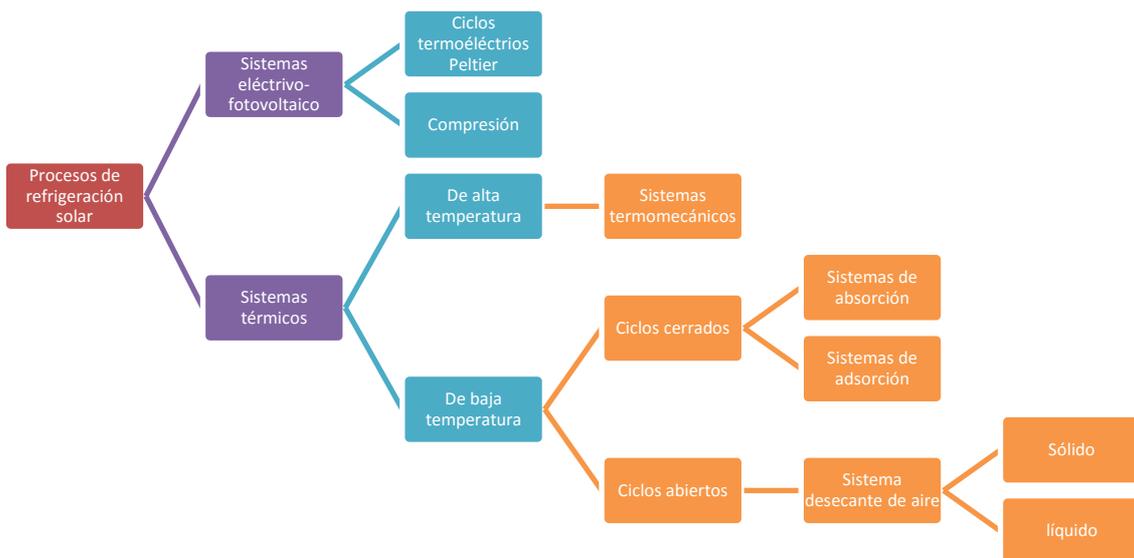


Figura 4: Esquema de los procesos de refrigeración solar

Será objeto de estudio la energía solar térmica, concretamente la de baja temperatura. Esta energía aprovecha el calor que se transmite cuando los rayos del Sol inciden sobre un panel solar. El sistema con el que se llega a climatizar un edificio, independientemente de su tamaño, se rige por los siguientes pasos: un sistema de captación recibe los rayos solares, absorbiendo la radiación en forma de calor; dicha energía se transmite a un fluido caloportador (normalmente agua) que pasa a través de los paneles solares; el fluido a elevada temperatura es almacenado en un subsistema de almacenamiento, donde intercambiará calor con otro fluido caloportador (o el mismo) a distinta temperatura; por último el fluido llega al punto de consumo de la manera deseada.

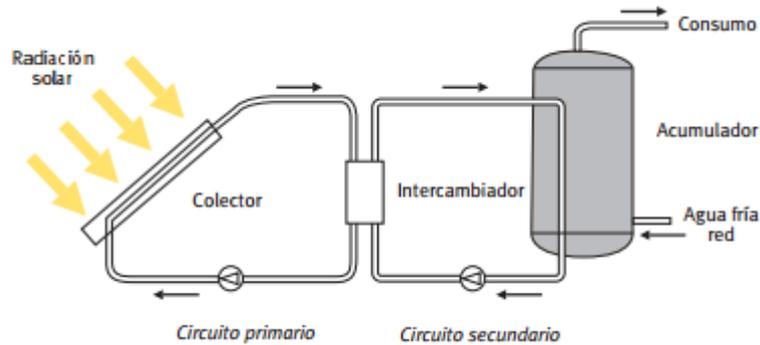


Figura 5: Esquema básico de una instalación solar de baja temperatura con aplicación de ACS [6]

Las principales aplicaciones de la energía solar térmica son:

- Agua caliente sanitaria (ACS) y precalentamiento de agua de proceso: se emplean instalaciones simples por lo que es muy rentable.
- Calefacción: apoyando a las calderas de los edificios, disminuyendo el consumo de combustibles fósiles (gasóleo, carbón...).
- Refrigeración: se aprovecha que las épocas de demanda coinciden con las de mayor radiación solar. Para producir frío se emplea las máquinas de absorción, adsorción y ruedas desecantes que se estudiarán a continuación.

2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN

Los sistemas de captación activos son los encargados de captar la radiación solar por medio del captador. Según como sea éste se puede llevar a cabo una conversión térmica a baja, media o alta temperatura, aprovechando el calor contenido en la radiación solar. La clasificación se rige por los siguientes valores:

- **Alta temperatura:** Captación de la radiación solar con un alto índice de concentración. La temperatura del fluido es superior a 250-300°C.
- **Media temperatura:** Captación de bajo índice de concentración. La temperatura del fluido abarca valores desde 80°C hasta 250°C-300°C.
- **Baja temperatura:** Se refiere a una captación directa, donde la temperatura del fluido está por debajo del punto de ebullición. La temperatura no supera los 80°C.

2.1.1. Sistemas de media y alta temperatura

En los sistemas de media y alta temperatura es necesario recurrir a colectores especiales de concentración, cuya función no es más que aumentar la radiación por unidad de superficie. La radiación solar se capta por medio de un conjunto de espejos curvos o heliostatos, que reflejan la luz del sol concentrándola en un único punto o foco. Estos espejos siguen el movimiento del sol durante el día y la concentración es posible gracias a la ayuda de programas informáticos, [7] ya que el movimiento del sol varía según la época del año. Así, el foco funciona como receptor del calor, transfiriéndolo al fluido de trabajo (agua, aceite, aire, sales, etc) encargado de la transmisión de calor a otra parte de la central termosolar. Generalmente se dispone de un depósito de agua al que llega la energía en forma de calor, lo que hace que suba la temperatura en este depósito evaporándose así el agua contenida, y aprovechando el vapor generado para mover una turbina.

Los receptores solares se pueden clasificar de dos maneras, desde el punto de vista arquitectónico: receptores externos o receptores de cavidad.

Cuando el receptor es de tipo externo, los heliostatos (de alta conductividad térmica) rodean completamente la torre central y cilíndrica, mientras que si la arquitectura es de cavidad, los heliostatos se colocan sólo en el norte de la torre.

Otra variedad son los discos parabólicos. Estos discos concentran la radiación solar en un receptor ubicado en el foco de la parábola. Este receptor absorbe la energía convirtiéndola en energía térmica. Inmediatamente se puede transformar la energía convirtiéndola en energía eléctrica mediante un generador o conducida mediante turbinas a una central de conversión.

2.1.2. Sistemas de baja temperatura

Por otro lado, el aprovechamiento térmico a baja temperatura se realiza a través de colectores planos. Una instalación solar térmica de baja temperatura está formada por captadores solares, dos circuitos de agua (uno primario y otro secundario), un intercambiador de calor, acumulador, vaso de expansión y tuberías.

El estudio de este proyecto prestará atención a los sistemas de baja temperatura, cuyos dispositivos se desarrollarán a continuación.

A. Captador solar plano

Se trata de los captadores más sencillos y por ello el tipo de captador más utilizado en muchas zonas del planeta. Su funcionamiento es la base de los sistemas de captación que se han ido desarrollando después. El fluido de trabajo utilizado suele ser agua, a menudo con anticongelantes, aunque es posible usar otros fluidos, tales como aire.

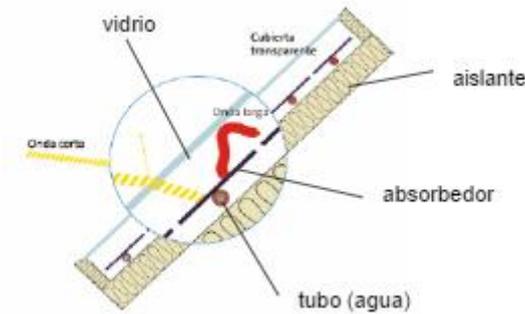


Figura 6: Sección de un captador solar plano [8]

Para incrementar la energía absorbida y reducir las pérdidas estos captadores suelen contar con distintos elementos:

- **Placa absorbidora:** Elemento donde la energía recibida en forma de radiación solar se convierte en energía térmica y se transfiere al fluido caloportador. La superficie absorbidora suele disponer de un tratamiento selectivo para tener la absorptividad más alta posible del espectro visible e infrarrojo cercano y la emisividad más baja posible del espectro infrarrojo correspondiente a las temperaturas de operación del captador.
- **Cubierta transparente:** Esta puede ser simple o doble e incluso triple, y tiene por objeto permitir el paso de la radiación solar de una forma óptima y provocar el efecto invernadero además de reducir las pérdidas.

Cabe destacar que para el rango de temperaturas dispuesto a ser estudiado, las pérdidas ópticas aumentan con el incremento de cubiertas adicionales, a la vez que las pérdidas térmicas disminuyen. Esto provoca que el rendimiento total aumente conforme aumenta el número de cubiertas.

- **Barreras de convección:** Película situada en la parte posterior de la cubierta de cristal que presenta una elevada transmitancia y gran resistencia al calor para reducir las pérdidas por convección.

- **Caja o carcasa:** Alberga los elementos que componen el captador solar y alberga el material aislante que impide las pérdidas térmicas por la superficie no transparente del captador solar.

B. Captadores solares de aire

Funcionan del mismo modo que los captadores planos, con la diferencia de que el fluido de trabajo no es agua sino aire. Esto hace que también se modifiquen los mecanismos para transportar el fluido y en vez de bombas se utilicen ventiladores.

El esquema de estos captadores es muy similar al de los captadores planos. Los elementos tienen las mismas funciones, distinguiendo el fluido que circula por los canales.

C. Captadores solares de tubo de vacío

Los tubos de vacío son los que están sufriendo un mayor auge. En gran parte es debido a la eficiencia y al bajo coste que presentan

Su funcionamiento es similar al de los captadores solares planos, sustituyendo el vidrio exterior y los canales de fluido por una hilera de tubos, en los cuales se ha hecho el vacío para minimizar las pérdidas. De este modo se impiden las transmisiones por conducción y convección al exterior, pudiéndose alcanzar temperaturas más altas y rendimientos mayores.

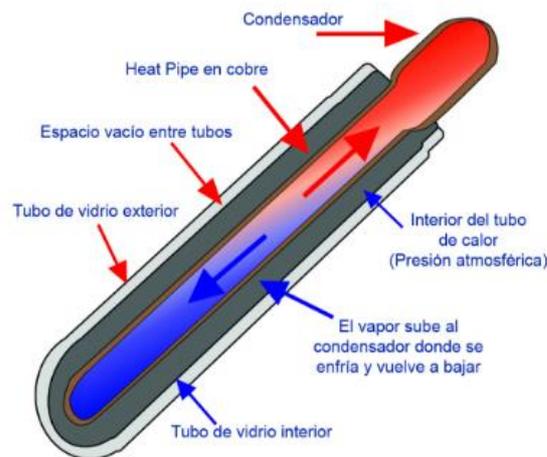


Figura 7: Esquema de un tubo de vacío [9]

Los colectores de tubo de vacío pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- *Flujo directo*: el fluido circula por el interior de los tubos aumentando su temperatura, de manera análoga a los captadores planos.
- *Flujo indirecto o Heat pipe*: el calor evapora un fluido mientras recorre el tubo y transporta el calor hasta un condensador situado en el extremo superior del tubo. Este sistema es una evolución del tubo de flujo directo que trata de eliminar el problema del sobrecalentamiento, presente en los climas más calurosos. Se utiliza un fluido que se evapora al calentarse, ascendiendo hasta un intercambiador ubicado en el extremo superior del tubo. Una vez allí, se enfría y vuelve a condensarse, transfiriendo el calor al fluido principal. Esta tecnología presenta una ventaja en zonas con climas cálidos, pues una vez evaporador todo el fluido del tubo, éste absorbe mucho menos calor, siendo difícil que los tubos se deterioren o estallen.

2.1.3. Comparación entre los distintos captadores

Se dispone a hacer una comparación entre los distintos tipos de captadores con el captador solar plano con agua como fluido caloportador.

Comenzando por la misma tecnología, pero con aire que, aun siendo similares, existen una serie de diferencias que hace posible la comparación entre ambas tecnologías. Estas son las siguientes:

Ventajas:

- No hay riesgo de fugas, calcificaciones ni corrosión
- No presenta problemas de congelación en invierno.
- Sencillez de construcción y utilización.
- Bajo coste.

Desventajas:

- No existen sistemas de acumulación en el mercado.
- El rendimiento de estos colectores es menor que el de los colectores planos.
- El consumo eléctrico de los ventiladores es mayor que el de las bombas del sistema hidráulico equivalente.
- Existen menos tecnologías que puedan utilizar, con buenos rendimientos, el aire como fluido térmico.

De los tubos de vacío se pueden destacar diferentes cosas, tales como los que se observan en los diferentes rendimientos de los captadores en función de la temperatura media de trabajo.

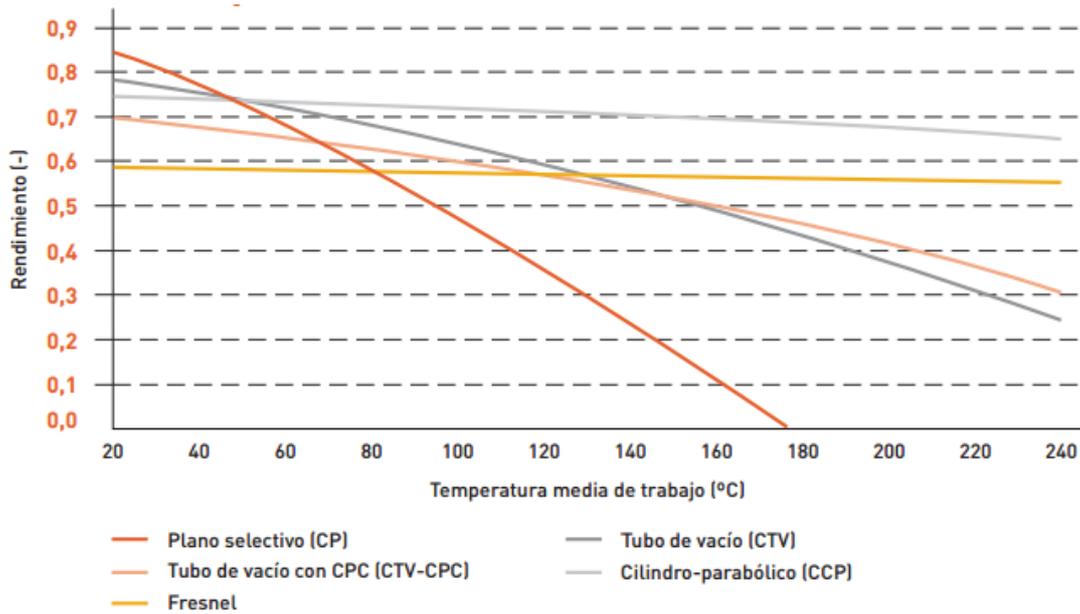


Figura 8: Curva rendimiento de captadores [10]

Ventajas:

- Su aislamiento, superior al de los captadores planos, lo hacen adecuarse mejor a climas con poca radiación o para aplicaciones que se necesiten temperaturas superiores a los 100°C.
- El rendimiento es superior al de los captadores planos y no es tan dependiente de variaciones de temperatura ambiente.
- Los costes de fabricación son mucho menores que el de las placas planas tradicionales.
- Además, una ventaja añadida de los tubos es su versatilidad de colocación, tanto desde el punto de vista práctico como estético, pues al ser cilíndricos toleran variaciones de hasta 25° sobre la inclinación idónea sin pérdida de rendimiento, lo que permite que se adapten a la gran mayoría de edificios.
- Al ser cilíndricos reciben rayos durante todo el día, al contrario que los captadores planos que sólo son efectivos cuando tienen el sol en posición perpendicular.

Desventajas:

- La fragilidad de los tubos ante condiciones meteorológicas adversas, tales como granizo, fuertes vientos, etc.
- Algunos tipos de captadores de tubo de vacío, debido a su alta temperatura de estancamiento, presentan un importante deterioro en juntas y aislamientos

2.2. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN SOLAR

Cabe destacar que los tres principales sistemas a estudiar se agrupan en función del tipo de ciclo que realicen, siendo de ciclo cerrado los sistemas de adsorción y absorción y de ciclo abierto los que utilizan ruedas desecantes.

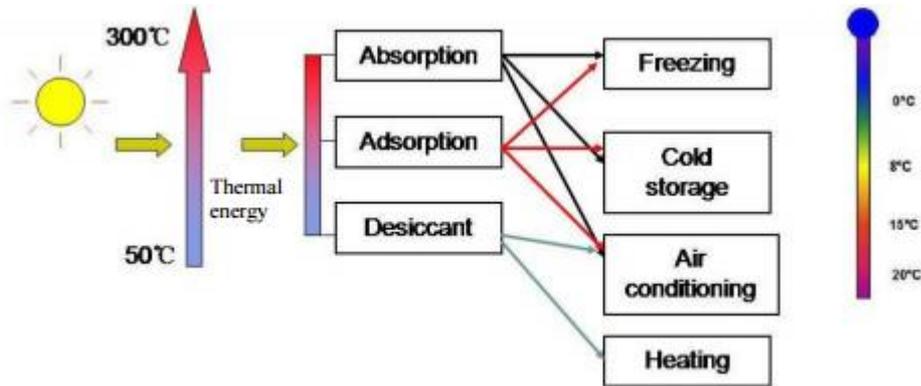


Figura 9: Procesos de conversión de energía en la refrigeración solar [11]

2.2.1. Ciclos cerrados

Los ciclos cerrados son máquinas frigoríficas que proporcionan agua fría para enviarla a unidades de acondicionamiento de aire. El fluido que se utiliza para evacuar el calor de la carga forma parte de un proceso cíclico cerrado. Los dos tipos de máquinas disponibles son las máquinas frigoríficas de absorción y las de adsorción.

I. Sistemas de refrigeración por absorción

Los equipos de absorción son, actualmente, la mejor alternativa entre los sistemas de refrigeración solar para sustituir los sistemas de refrigeración convencionales. Es por eso que son los sistemas de frío solar más utilizados a día de hoy, y esto se debe a que su tecnología es madura y se viene desarrollando desde hace años. Su rendimiento es de los más elevados en este tipo de sistemas y encaja a la perfección si se utiliza energía solar.

Es tal el desarrollo de esta tecnología que tiene un rango de potencia muy amplio, encontrándose equipos entre 4.5 y 200 kW para climatización de edificios, lo que significa que puede ser usado en casi cualquier tipo de instalación. Históricamente las máquinas de absorción no se fabricaban de baja potencia por dificultades técnicas y baja rentabilidad pero en la última década se han desarrollado máquinas de menos de 100 kW.

El funcionamiento de cualquier máquina de refrigeración por absorción se basa en tres fenómenos físicos elementales:

- 1- Cuando un fluido se evapora absorbe calor y cuando se condensa cede calor.
- 2- La temperatura de ebullición de un líquido varía en función de la presión, es decir, a medida que baja la presión, baja la temperatura de ebullición.
- 3- Hay establecidas parejas de productos químicos que tienen cierta afinidad a la hora de disolver el uno al otro. El par más usado es principalmente el de Agua-Bromuro de Litio, aunque también es utilizado el par Amoniaco-Agua en aplicaciones donde es necesaria una temperatura menor de 0°C.

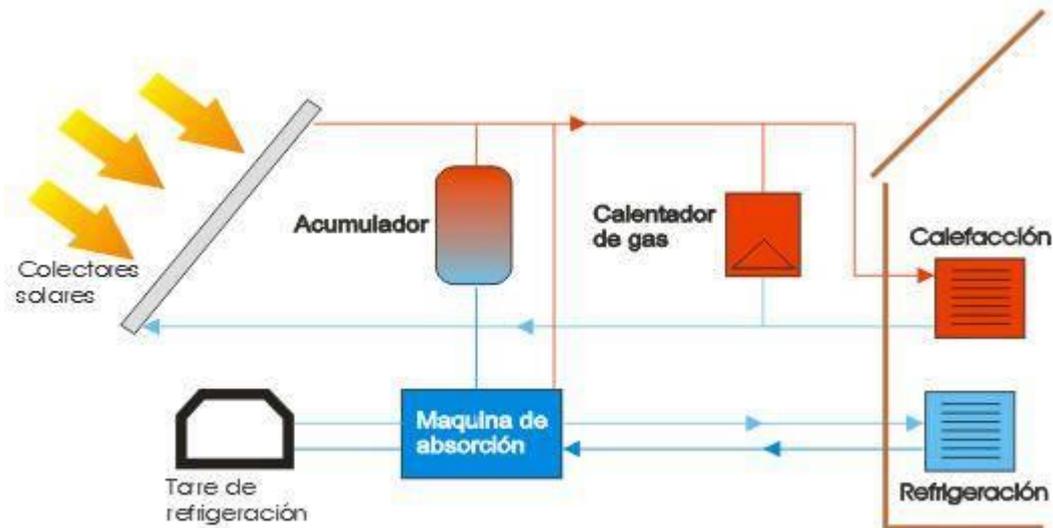


Figura 10: Esquema de una instalación de refrigeración con absorción [12]

Cuando la radiación solar no es suficiente para calentar el agua a la temperatura requerida por la máquina de absorción, se utiliza una caldera de apoyo para completar la demanda energética necesaria.

La principal clasificación posible en estos sistemas hace referencia al número de efectos. El número de efectos se refiere a las veces que se utiliza la energía aportada desde el foco caliente en el sistema, es decir, al número de generadores del que dispone el sistema. Se pueden distinguir máquinas de simple efecto, de doble efecto y hasta de tripe efecto, que se ha sumado recientemente. Se destaca que cuantos más efectos tenga el sistema, mayor será el rendimiento del mismo, pero con ello la temperatura de operación aumenta.

En función del par de fluidos con el que trabaje la máquina se dan una serie de características para el sistema. Para las instalaciones $BrLi/H_2O$ se usa el agua como refrigerante y el bromuro de litio como absorbente. El bromuro de litio no es tóxico para el ser humano, por lo que las medidas de seguridad necesarias para trabajar con este tipo de sustancia son escasas.

Las máquinas de doble efecto e incluso de triple efecto con $BrLi/H_2O$ son ya una realidad. Las presiones que se alcanzan en el generador son manejables incluso para máquinas de triple efecto. En la tabla 1 se muestra el COP y la temperatura de activación en función del número de etapas.

	Simple efecto	Doble efecto	Triple efecto
COP	0.7	1-1.2	1.5
Temperatura de activación	~85°C	~150°C	~200°C

Tabla 2: Prestaciones de las máquinas bromuro de litio-agua

Una de las principales desventajas de las máquinas que usa bromuro de litio es la cristalización de esta sustancia. Existe una zona de peligro de cristalización del bromuro de litio que la máquina debe evitar. Esta zona se define por concentraciones comprendidas entre el 65-70% de $BrLi$ y para temperaturas que se sitúan entre los 48 y 105°C. Las máquinas se diseñan para trabajar fuera de esas condiciones.

Además de la cristalización, la corrosión, sobre todo en presencia de oxígeno, es un problema que afecta a los sistemas que trabajan con bromuro de litio. Por ello es necesario añadir a la disolución de trabajo algún tipo de inhibidor de corrosión.

Por último, otro inconveniente frente al otro tipo de par de fluidos es, que al ser el agua el refrigerante, estos sistemas no pueden ser utilizados para la congelación porque es imposible alcanzar temperaturas menores de 0°C sin que el agua se congele. Por lo tanto estos sistemas son utilizados para climatización, pudiendo dar temperaturas de hasta 7°C de mínima.

En los sistemas NH_3/H_2O el amoníaco es el refrigerante y el agua el absorbente. Las máquinas que trabajan con amoníaco, por su carácter tóxico, necesita numerosas medidas de seguridad además de sistemas indirectos.

Tienen un menor rendimiento que las máquinas de bromuro de litio y además necesitan temperaturas superiores para regenerar la solución absorbente. Será necesaria una torre de destilación para separar el amoníaco, debido a su facilidad de evaporación, al contrario que el bromuro de litio que no se evapora. En la tabla 2 se muestra el COP y la temperatura de activación de los diferentes tipos de máquinas que trabajan con amoníaco y agua.

	Ciclos de simple efecto	Ciclos GAX
COP	0.6	1
Temperatura de activación	~90°C	~160°C

Tabla 3: Prestaciones de las máquinas bromuro de litio-agua

El ciclo *GAX* es una mejora del ciclo de simple efecto, aún en desarrollo, en el que el sistema funciona a dos niveles de presión en el que se consigue un mejor aprovechamiento energético con la adición de intercambiadores y determinados sistemas de regulación.

Por otro lado, debido a las altas presiones que se alcanzarían en el generador, no existen máquinas de doble ni triple efecto que trabajen con este par de fluidos.

Sin embargo, estas máquinas pueden producir temperaturas menores de 0°C ya que el refrigerante en este caso es el amoníaco y su punto de congelación se da a los 77°C y no hay peligro de cristalización del fluido de trabajo.

Una vez señaladas las características generales de los distintos pares de trabajo posibles y más importantes se procede a explicar el funcionamiento básico de las máquinas según el número de ciclos. Se tomará como base las máquinas que usan bromuro de litio-agua, por ser las que dominan el mercado.

Máquinas de absorción con ciclo de simple efecto

A grandes rasgos, el refrigerante sale del evaporador en forma de gas y es enviado al absorbedor, donde una solución concentrada del absorbente absorbe dicho refrigerante. La solución diluida formada para directamente por una bomba hasta llegar al generador (zona de alta presión). Al aplicar calor en el generador, ya sea proveniente del campo solar o si este es insuficiente, de la caldera de apoyo, se produce desorción del refrigerante en forma de gas. Este es enviado al condensador para continuar el ciclo cerrado

de producción de frío y la solución resultante, que ha perdido gran parte del agua absorbida con anterioridad será una solución concentrada de nuevo para repetir el ciclo de absorción.

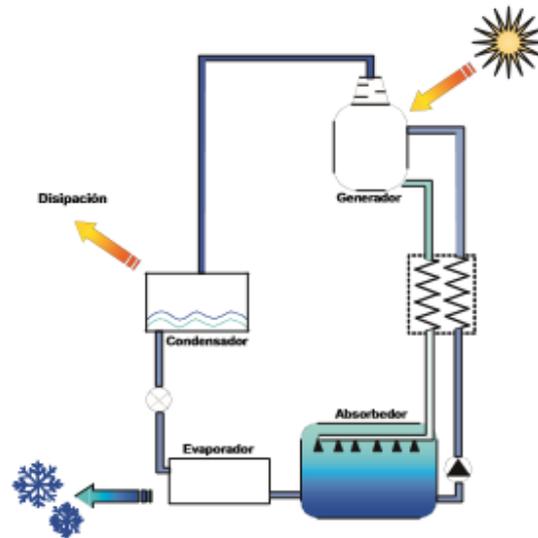


Figura 11: Refrigeración solar por absorción de simple efecto [13]

La absorción se favorece por bajas presiones y bajas temperaturas, además de que es un proceso endotérmico. Por ello es necesaria una refrigeración externa en el absorbedor para que se mantengan las condiciones de temperatura y presión deseadas. En cambio, como para la desorción se requieren temperaturas altas para la separación del fluido absorbedor y absorbido, se instala también un intercambiador o generador.

Los principales componentes de una refrigeradora por absorción son: el generador, el absorbedor, el condensador, el evaporador, la válvula de expansión, la bomba de impulsión y el intercambiador de calor.

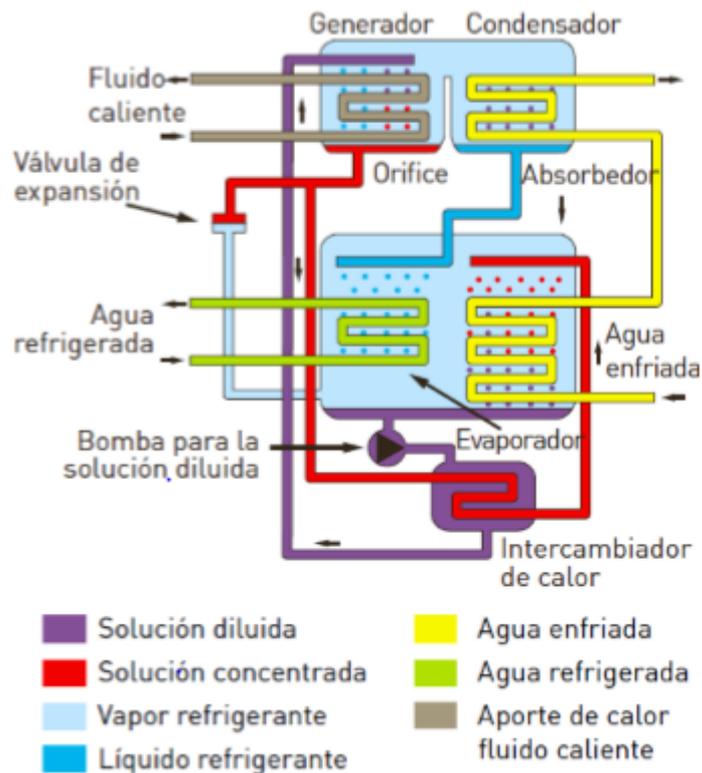


Figura 12: Esquema de una enfriadora de absorción [12]

Una máquina de absorción se puede dividir en dos estados de presión: el de baja presión, donde operan el evaporador y el absorbedor; y el de alta presión, donde trabajan el condensador y el generador. El funcionamiento de la máquina de absorción $BrLi/H_2O$ de simple efecto y sus principales fases se describen a continuación:

- El refrigerante (agua) se evapora en el evaporador a muy baja temperatura y presión (cerca de 0.8 kPa), extrayendo de esta forma el calor del fluido que se quiere enfriar y produciendo de esta manera el frío útil del sistema.
- El vapor de refrigerante fluye hacia el absorbedor, que está conectado directamente con el evaporador y en muchas ocasiones comparten el mismo espacio. En el absorbedor el refrigerante es absorbido por la solución concentrada (alta concentración del absorbente) formándose una solución diluida. Dado que el proceso es un proceso endotérmico es necesario evacuar el calor y esto se hace a través de un serpentín de refrigeración por el que suele fluir agua enfriada en una torre de refrigeración.
- La solución diluida, producida en el absorbedor, es bombeada hacia el generador para calentarse a través de un foco caliente (captadores solares) hasta que se produzca la ebullición del refrigerante. De esta forma el refrigerante es separado de la solución a alta presión. La solución resultante, una solución concentrada, es devuelta al absorbedor donde se dispondrá para repetir el proceso.

- El vapor de refrigerante a alta presión fluye hacia el condensador, que se encuentra conectado directamente al generador. Aquí el refrigerante es condensado mediante agua de refrigeración. En la mayoría de los casos esta agua será la misma que se ha utilizado con anterioridad para refrigerar el absorbedor y que tras ser utilizada en el condensador llegará a la torre de refrigeración donde se evacuará todo el calor producido en el circuito.
- El paso desde el condensador hasta el evaporador se realiza mediante una válvula de expansión que reduce la presión hasta la presión del evaporador. El nuevo ciclo comenzará cuando el fluido refrigerante llegue de nuevo al evaporador.

Cabe destacar el ahorro y mejor aprovechamiento de la energía que se consigue gracias al intercambiador de calor, que enfrenta la solución diluida que sale del absorbedor (solución fría que quiere calentarse) y la solución concentrada que sale del generador (solución caliente que se envía al absorbedor para ser enfiada).

La torre de refrigeración es necesaria para condensar el vapor de refrigerante producido en el generador, así como para refrigerar el absorbedor. La condensación por agua es la que se usa en gran mayoría de las máquinas de absorción hasta hoy. Pero el uso de esta tecnología trae consigo numerosos inconvenientes como es la gran superficie al aire libre necesaria para su instalación, además de la estricta reglamentación y el riguroso control que deben seguir para evitar la aparición de bacterias como la legionela. El uso de estas torres es uno de los mayores inconvenientes que tienen las máquinas de absorción y por ello no se ha implantado todavía en sistemas domésticos o en pequeñas aplicaciones.

Gracias a esto se está desarrollando la idea de implantar máquinas de absorción refrigeradas por aire. El uso de aire como fluido condensador conlleva un aumento de la temperatura de condensación y esto repercute a su vez en la temperatura de ebullición de los generadores. Además esto obliga a que los intercambiadores y los conductos sean de mayor tamaño ya que no es posible extraer la misma cantidad de calor por unidad de masa. Estos inconvenientes hacen que aún el problema del uso de torres de refrigeración no esté solucionado.

Se describen ahora los elementos más importantes de la máquina de absorción:

A. Generador

El generador es el componente donde, gracias a la energía térmica que le llega a través de un fluido caliente, el refrigerante se separa en forma de vapor absorbente. El fluido, normalmente agua caliente o vapor, fluye a través de unos tubos inmersos en la solución.

Al generador llega la solución diluida y gracias al fluido caliente, parte del agua de la solución se separa y da lugar a la solución concentrada de bromuro de litio, que se envía al intercambiador y posteriormente al intercambiador. El vapor de agua restante se lleva al condensador pero una pequeña parte de este se inyecta desde el generador al absorbedor como medida de regulación del ciclo.

Este elemento es la clave de la instalación, en él se marca la temperatura a la que tiene que llegar el fluido, lo que es un punto clave en las instalaciones solares de absorción. La instalación, el dimensionado y el tipo de captadores vienen marcados por esa temperatura.

B. Condensador

El condensador es el encargado de condensar el vapor de refrigerante que le llega del generador. El agua condensada es enviada, tras bajar su presión, al evaporador. La función es la misma que en los sistemas convencionales pero la tipología difiere bastante. Este se sitúa en la zona de alta presión de la máquina y la mayoría de las veces no están conectadas por conductos sino bajo la misma carcasa.

La gran mayoría son condensadores que usan agua, tal y como se ha mencionado con anterioridad, pero se está desarrollando la idea de usar aire.

C. Evaporador

El evaporador es el encargado de producir el frío útil del sistema. El agua líquida que se forma en el condensador le llega al evaporador y se pulveriza sobre unos tubos por donde pasa el fluido que se quiere enfriar. De esta manera y gracias a la baja presión, el agua se evapora y a continuación llega al absorbedor.

Se distinguen dos tipos de evaporadores, evaporadores de expansión directa y evaporadores por inundación. En las máquinas de absorción el que usa mayoritariamente es el de inundación, con la diferencia de que, en este caso, el refrigerante suele ser pulverizado sobre los tubos, parte se evapora y la otra parte es recogida en una bandeja y recircula de nuevo hasta los pulverizadores.

D. Absorbedor

Es sin duda uno de los componentes más importantes de las máquinas de absorción. Este dispositivo tiene como objetivo poner en contacto dos corrientes: una gaseosa (refrigerante) y otra líquida (absorbedor), mientras se evacúa el calor generado en la absorción por medio de agua de disipación. La solución concentrada se pone en contacto con el vapor de agua proveniente del evaporador, formándose una solución que se envía al generador.

La absorción del vapor refrigerante crea una zona de baja presión dentro del absorbedor que, unido a la afinidad del bromuro litio por el agua, induce un flujo continuo de vapor de refrigerante desde el evaporador. Esto facilita la mezcla y la absorción del agua en la solución.

El absorbedor y el evaporador se encuentran en la misma carcasa, en la zona de baja presión teniendo un espacio común.

Si el generador era esencial a la hora de diseñar el sistema solar, el evaporador lo es para el diseño de la máquina. Cuanto mejor sea la mezcla y la absorción ente el vapor y la solución de trabajo, mejores serán los parámetros de funcionamiento de la máquina.

Los absorbedores más utilizados son los absorbedores con fases vapor líquido continuo y con fase de vapor continuo y líquido discontinuo.

Máquinas de adsorción con ciclo de doble efecto

La principal diferencia, tal y como indican sus nombres, es que ahora se tienen dos efectos en vez de uno, es decir, la energía térmica se utiliza dos veces en el sistema. Es por esto que la máquinas de doble efecto tienen dos generadores de vapor, el de alta presión y el de baja.

Al tener dos generadores, suele tener además dos recuperadores de calor y dos válvulas de expansión, aunque depende del tipo de máquina que se elija. El resto, como en los ciclos de simple efecto, está formado por un condensador, un evaporador y un absorbedor.

En estos ciclos se realizan dos separaciones de vapor a partir de un aporte inicial de energía térmica, por lo que se consigue un aumento considerable de rendimiento. La energía que se suministra tiene que ser de un nivel térmico superior a la del ciclo de simple efecto (~120-170°C). Estas temperaturas se alcanzan con pocos captadores, siendo los de vacío y los cilindro-parabólicos los más típicos pero, al ser temperaturas tan elevadas se cuestiona la rentabilidad de utilizar energía solar para su completo funcionamiento.

Para analizar mejor la configuración de la máquina se muestra un esquema de un tipo de ciclo de doble efecto donde se puede apreciar los componentes principales y cuál es su conexión.

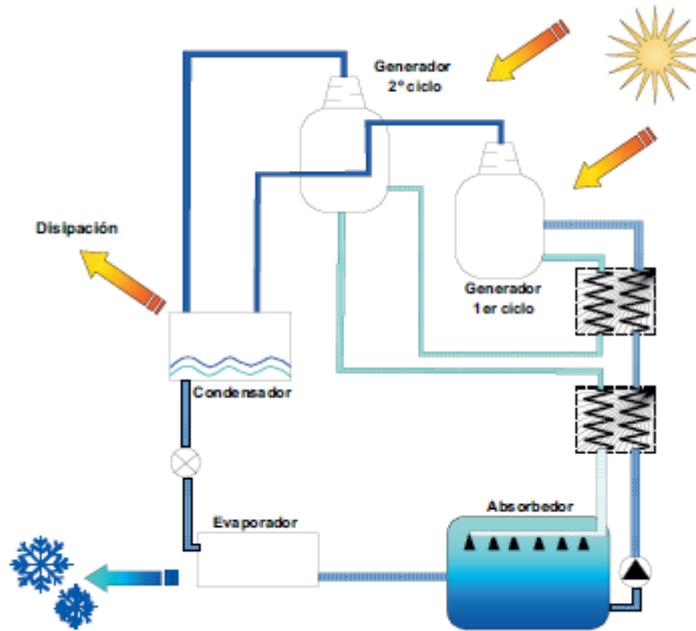


Figura 13: Esquema de principio de una máquina de absorción de doble efecto [13]

El generador de alta temperatura usa el aporte externo de energía para evaporar el refrigerante de la solución absorbente. El vapor de refrigerante a alta presión es condensado y el calor producido en la condensación se usa para separar el vapor refrigerante en el generador de baja temperatura. Es decir, se usa el vapor a alta temperatura para separar vapor en el generador de baja temperatura. Después de esto el ciclo será similar al de simple efecto, solo que es sistema opera a tres niveles distintos de presión y a cuatro de temperaturas.

El ciclo real es más complejo, tal y como se muestra en la siguiente figura:

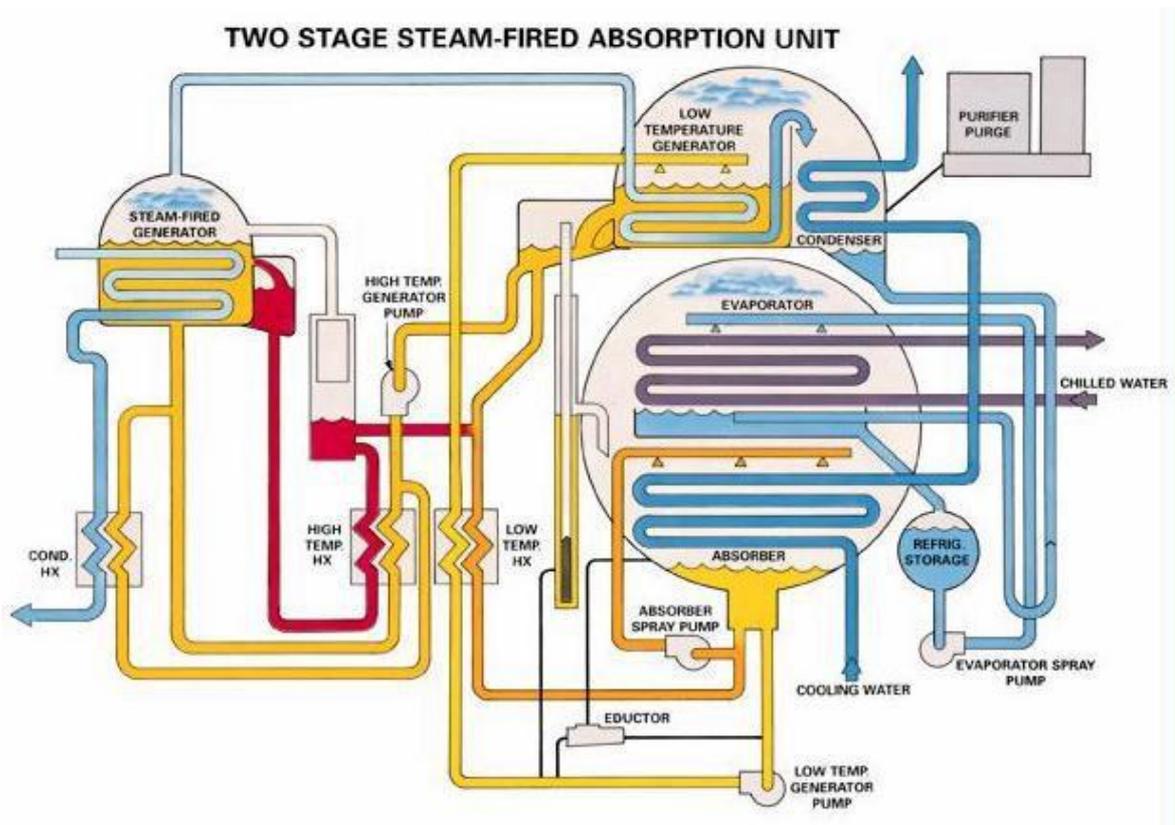


Figura 14: Máquina de absorción de doble efecto [15]

En la imagen se distinguen los fluidos de trabajo que circulan por la máquina que son: solución diluida (*amarillo*); solución semiconcentrada (*naranja*); solución concentrada (*rojo*); refrigerante líquido (*azul*). Como en la máquina de simple efecto, los intercambiadores tienen como función la de aumentar el aprovechamiento energético y ponen en contacto dos corrientes con diferentes temperaturas para precalentar o enfriarlas.

Se distinguen dos tipos de máquinas de absorción de doble efecto según el tipo de flujo. La tipología mostrada en la figura anterior es de tipo *flujo en serie*, porque la solución va del absorbente al generador de baja y después al de alta, es decir, el flujo sigue un circuito en serie. Por el contrario, cuando la disolución procedente del absorbente se divide en dos corrientes se da el caso de las máquinas de *flujo en paralelo*. Una de las corrientes se dirige hacia el generador de alta temperatura y la otra corriente se dirige al de baja, de esta forma se alimentan los dos generadores de forma independiente.

La elección del modo de distribuir la disolución que circula desde el absorbente hacia los generadores es una de las decisiones más importantes que hay que tomar al diseñar una máquina de absorción de doble efecto.

De forma general, las máquinas de doble efecto con distribución de flujo en paralelo tienen un COP mayor que las de flujo en serie. Uno de los beneficios que se consiguen con esta distribución es la mejora del proceso de separación del vapor refrigerante, ya que se disminuyen las caídas de presión. En cambio se necesitan mayores sistemas de control y la instalación se vuelve un poco más compleja.

❖ **Análisis comparativo de la refrigeración solar en los distintos tipos de máquinas de absorción**

Se han destacado dos tipos de máquinas principales, cada una con sus características. Para un análisis correcto en el que se compruebe si pueden ser utilizadas para refrigeración solar se pondrá la vista en la temperatura de generación. Esta temperatura se refiere a la temperatura que el fluido caloportador tiene que alcanzar al pasar por el captador solar.

Existen también las máquinas de triple efecto pero, dado que estos sistemas necesitan temperaturas extremadamente altas no se incluirán en el análisis.

En la tabla se puede ver un resumen de los parámetros más importantes de las máquinas de simple y doble efecto.

	Simple efecto	Doble efecto	Doble efecto
Medio	Agua caliente	Agua sobrecalentada	Vapor
Temperatura generador (°C)	75-95	120-170	120-170
Temperatura de impulsión/retorno del fluido (°C)	6/12	4.5/15	6/12

Tabla 4: Comparativa de máquinas de absorción

Para accionar los sistemas de doble efecto son necesarios sistemas de captación de alta eficiencia y mayor precio, sin embargo para las máquinas de simple efecto pueden servir la gran mayoría de captadores. Como parte negativa, las máquinas de simple efecto tienen menor COP, cerca de la mitad que las máquinas de doble efecto.

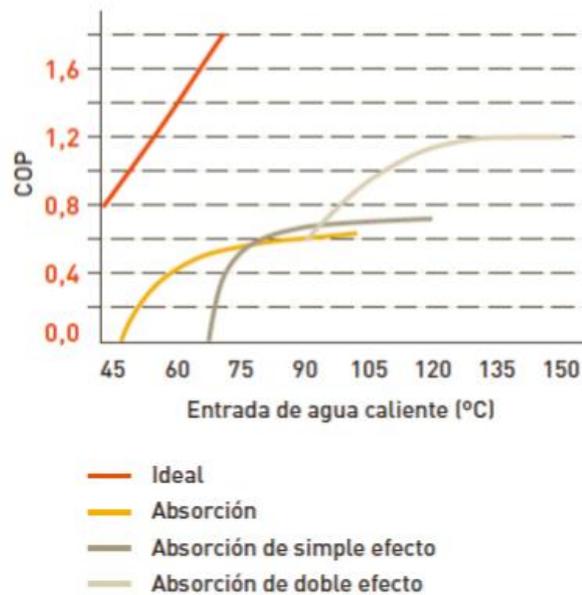


Figura 15: Comparación de las máquinas de absorción según COP y temperatura de activación. [10]

Se procede a analizar la tecnología de las máquinas de absorción.

Ventajas

- Utilizan refrigerantes naturales y no perjudiciales para el ambiente.
- Tecnología madura. Fiabilidad y flexibilidad en el funcionamiento.
- Máquinas silenciosas. Únicas partes móviles las bombas.
- Los COP son elevados comparados con otras tecnologías de refrigeración solar.
- Flexibilidad en la alimentación de la energía de activación: agua caliente, agua sobrecalentada, vapor o llama directa.
- Gran disponibilidad de potencias en el mercado.
- Necesitan menor mantenimiento que otras tecnologías aunque más especializado.

Inconvenientes

- Tanto para sistemas de simple efecto como para los de doble efecto las temperaturas necesarias en el generador son más elevadas que en las otras tecnologías de frío solar.
- Elevado coste inicial del sistema.
- Necesidad de torre de refrigeración en la mayoría de las instalaciones actuales (recientes instalaciones condensadas por aire).

- Necesidad de presiones muy bajas en muchos puntos del sistema, por lo que es necesaria una buena calidad de materiales y fabricación.

II. Sistemas de refrigeración por adsorción

La adsorción es el fenómeno por el cual un sólido o un líquido atrae y retiene en su superficie sustancias disueltas en cualquier estado. Un sistema de adsorción movido con energía solar es un sistema cerrado que tiene dos fases en la etapa de refrigeración: refrigeración/adsorción y regeneración/desorción. Estos ciclos alternativos se deben a la capacidad de hacer reversible el proceso de adsorción de los sólidos microporosos. En este caso las fuerzas responsables de esto no son las fuerzas químicas, sino las físicas.

El refrigerante se evapora a su paso por el generador (o evaporador) para ser adsorbido por una sustancia sólida que tenga una muy alta porosidad microscópica. Posteriormente, en el proceso de regeneración, el adsorbedor se calienta hasta conseguir que el refrigerante se desorba volviendo al evaporador, que actúa como condensador.

Existen pares de refrigerante-adsorbedor como son: Agua-Zoolita, Agua-Gel de sílice, Metanol-Carbón activado. El adsorbente más extendido hasta la actualidad es el gel de sílice ya que tiene una temperatura de regeneración sensiblemente menor a la de otros materiales y, en consecuencia, los requisitos de temperatura son fácilmente alcanzables por el sistema de refrigeración mediante energía solar. El agua es el elemento más común que trabaja como sorbato debido a su alta entalpía de vaporización, su alta disponibilidad y su inocuidad.

La máquina de adsorción necesita un aporte térmico para que pueda completarse el ciclo. Es el proceso de desorción, separar el adsorbente y refrigerante, el que necesita de un aporte térmico ya que la temperatura necesaria para que se dé el proceso se encuentra entre los 60 y 90°C. Esta temperatura, que no es demasiado alta, puede conseguirse mediante una caldera, un efluente térmico o, como es el caso, mediante energía solar. Cuando la energía solar no sea suficiente para obtener la temperatura deseada se hace uso de un aporte auxiliar a través de una caldera.

El rango de potencia de los equipos que se basan en la tecnología de adsorción se encuentra entre 50 y 430 kW, lo cual permite su uso en un gran número de instalaciones. Los COP de estos equipos están entre 0.3-0.7, y los rangos de temperatura que debe aportar la instalación solar abarcan desde 45 hasta 90°C. Todo ello permite utilizar estos sistemas en diversas ocasiones. Los elementos de captación necesarios serán también placas planas y tubos de vacío principalmente, ya que la temperatura requerida puede conseguirse con estos dispositivos.

En contra, en COP con valores bajos y la falta de fabricantes, convierten a estos sistemas en poco rentables además de caros.

Se muestra en la *Figura 16* un esquema de lo que sería una instalación de climatización que hace uso de la adsorción.

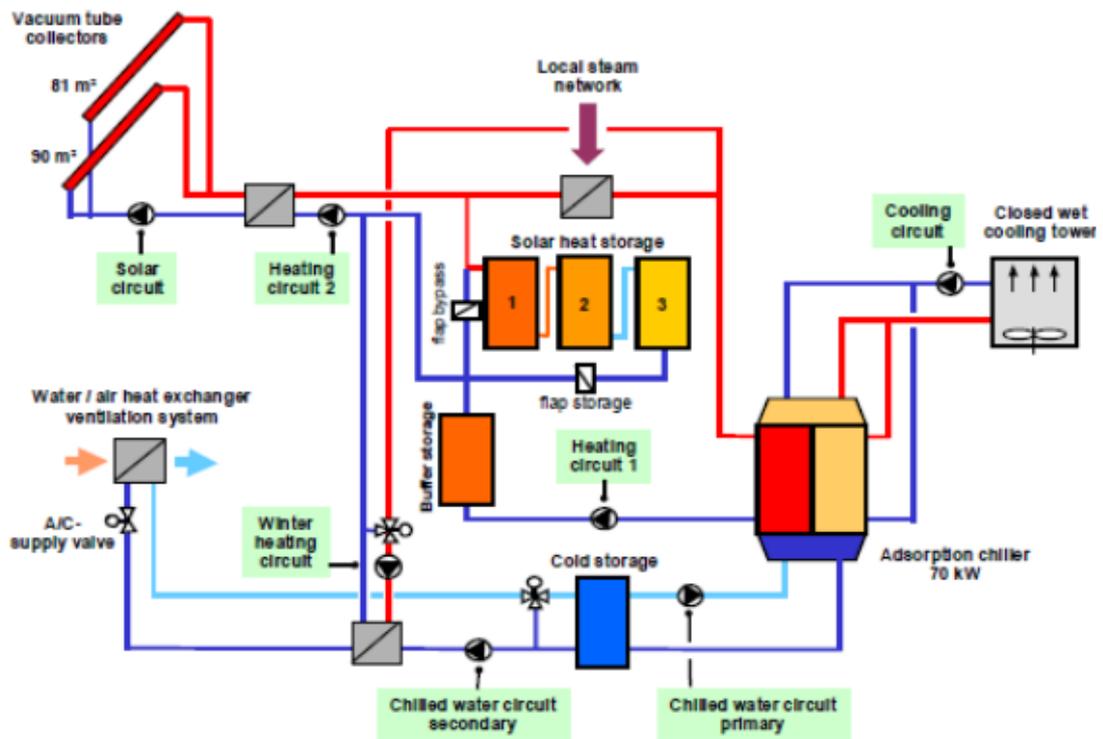


Figura 16: Esquema de un sistema de refrigeración por adsorción

A continuación se explicará el funcionamiento de las máquinas de adsorción con ciclo de simple efecto que utiliza gel de sílice como adsorbente y agua como refrigerante, ya que es el más utilizado en las máquinas comerciales. La figura 17 muestra el esquema de una enfriadora de este tipo.

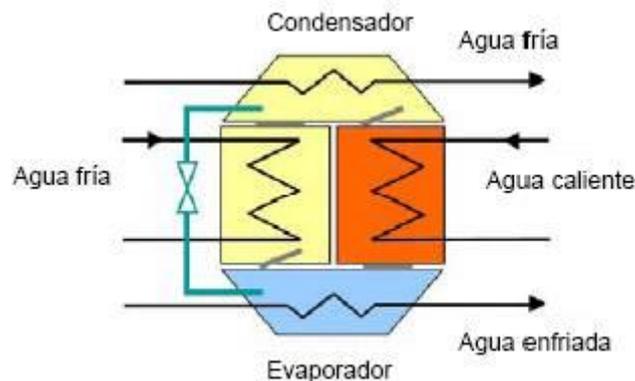


Figura 17: Esquema de una enfriadora por adsorción [12]

Tal y como se representa en el esquema, una máquina de adsorción de este tipo consta de cuatro compartimentos conectados mediante puertas. Las distintas partes que la componen son: un evaporador; dos cámaras de adsorción, que es donde se dan lugar los procesos de adsorción y desorción; y un condensador. Las cámaras existentes funcionarán intermitentemente.

El ciclo consta de cuatro etapas:

1. *Calentamiento e incremento de presión.*
2. *Calentamiento y desorción.*
3. *Enfriamiento y despresurización.*
4. *Enfriamiento y adsorción.*
- 5.

Se debe señalar que en estas máquinas el ciclo no se da instantáneamente, el ciclo comienza cuando, en el evaporador, se evapora el fluido refrigerante (agua), que se encuentra a baja presión, aportando el frío del sistema. La válvula que une el evaporador con la cámara en la que se está dando la adsorción (*Cámara 1*) se abre, de esta forma el vapor de agua que se ha generado previamente entra en dicha cámara es adsorbido por el gel de sílice (adsorbente) que se va saturando durante el proceso. Se trata de un proceso exotérmico que se refrigera mediante una torre de refrigeración debido a que el proceso de adsorción se ve favorecido por temperaturas bajas.

Mientras, en la otra cámara tiene (*Cámara 2*) tiene lugar el proceso de desorción para regenerar el adsorbente que se encuentra saturado. Como este proceso es endotérmico, se hace circular agua caliente a través del intercambiador de calor. La válvula que conecta esta cámara con el evaporador está cerrada. La presión en el interior es ligeramente superior a la presión en el condensador, por lo que el vapor de agua que se libera del adsorbente como consecuencia del proceso de desorción para al condensador del equipo.

En el condensador el fluido refrigerante condensa, cediendo calor al agua del circuito de la torre de refrigeración. El vapor de agua condensado pasa al evaporador a través de la válvula de expansión, cerrándose el ciclo.

En el momento en el que el adsorbente de la *Cámara 1* se encuentra saturado de agua y el adsorbente, en la *Cámara 2*, está seco, la máquina automáticamente invierte las funciones de las dos cámaras. El primer paso será cerrar las válvulas entre las dos cámaras permitiendo que las presiones se igualen. Acto seguido, se hace pasar el agua caliente de la cámara de desorción (*Cámara 2*) a través de la otra cámara para aumentar su temperatura mediante la transmisión de calor. Análogamente se repite el proceso para enfriar la *Cámara 2*. Dicho proceso de inversión se completa cuando la *Cámara 1* alcanza la temperatura y presión requerida

para darse la desorción, y además la *Cámara 2* se haya enfriado lo suficiente para volver a adsorber el refrigerante.

A continuación se repite el proceso completo pero intercambiando las funciones de ambas cámaras.

Finalmente, será necesaria una nueva inversión del funcionamiento para comenzar el ciclo nuevamente, hasta volver a completarlo.

Las máquinas comerciales están provistas de una serie de sensores y automatismos que hacen que la máquina invierta el funcionamiento cuando sea necesario y que opere de manera automática.

Este sistema, que es análogo al proceso de refrigeración por compresión mecánica convencional, presenta el problema de generar frío sólo en la cuarta etapa de un proceso no continuo. Esto hace que la generación de calor solo se produzca en un cuarto del ciclo y que, por lo tanto, no sea una generación de frío continuada. El desarrollo de estos sistemas está permitiendo que puedan generar frío de manera continuada como consecuencia de operar con varias cámaras desfasadamente.

Una configuración conocida y que mejora significativamente el rendimiento se consigue añadiendo 3 o más cámaras adsorbentes, además de varios evaporadores con distintos niveles de presión, con lo que se consigue un aumento del rendimiento con respecto a las máquinas de diseño más simple.

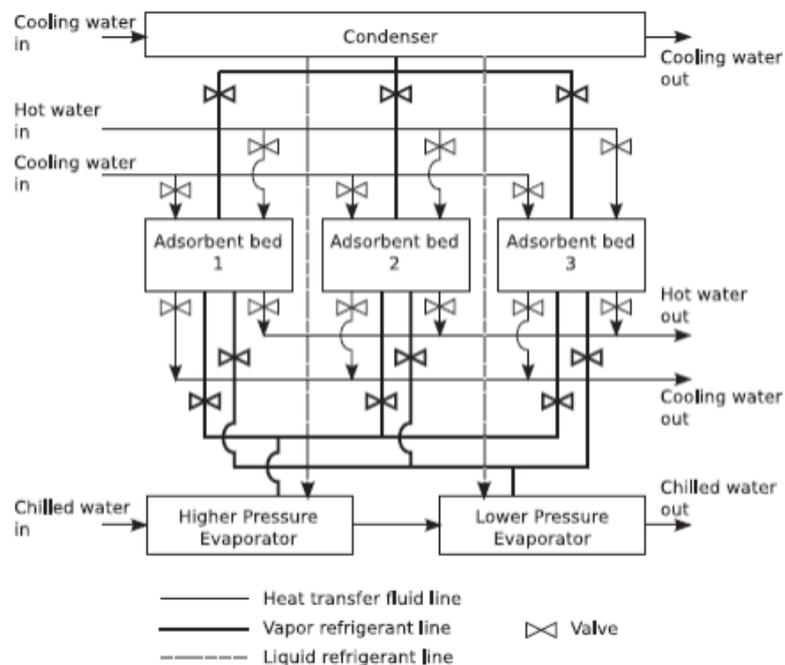


Figura 18: Esquema de una máquina de adsorción con 3 cámaras adsorbentes y 2 evaporadores. [17]

Este tipo de máquinas pueden alcanzar unos valores de COP de 1.2, casi el doble que las de simple efecto. Las temperaturas demandadas son del entorno de los 160°C. Debido a este valor de la temperatura, estos sistemas apenas existen en el mercado y aún sería más difícil encontrarlos unidos a un sistema de captación solar. Antes de recurrir a esta tecnología se optaría por un sistema de absorción de doble efecto, ya explicados con anterioridad, debido a su madura tecnología.

Se procede a destacar las ventajas y desventajas del uso de esta tecnología:

Ventajas

- Las temperaturas necesarias para la desorción en las máquinas de simple efecto están entre 60-90°C, por lo que se pueden utilizar incluso captadores de placa plana.
- El consumo eléctrico es muy pequeño. No es necesario el uso de bombas internas. Por lo que apenas tiene componentes que demanden energía eléctrica.
- No existe riesgo de cristalización, por tanto, tampoco hay límites en las temperaturas de disipación de calor.
- Son máquinas que son simples mecánicamente y sin apenas piezas móviles. Por ello se trata de máquinas robustas.

Inconvenientes

- Volumen y peso comparativamente elevado.
- Requiere grandes vacíos en las cámaras de adsorción.
- El COP es inferior que el de las máquinas de absorción.
- Su precio es bastante elevado, ya que no ha tenido cabida en el mercado.

2.2.2. Ciclos abiertos

Los sistemas de ciclo abierto generan ya aire en ciertas condiciones, frente a los ciclos de adsorción que generan agua fría. Este tipo de ciclos se basan en una mezcla de enfriamiento evaporativo y deshumidificación del aire gracias a una sustancia desecante. Se utiliza el término abierto para indicar que el refrigerante no se recupera después de proporcionar el efecto frigorífico. Las ruedas desecantes suele emplear como material desecante gel sílice o cloruro de litio, pero se pueden usar otros tipos de desecantes, tanto líquidos como sólidos.

I. Sistemas de refrigeración por ruedas desecantes

Los sistemas de enfriamiento evaporativo con ruedas desecantes se están convirtiendo en una alternativa a los sistemas tradicionales de refrigeración, y están siendo cada vez más objeto de estudio por parte de muchos investigadores, tanto en la variedad de las sustancias desecantes, como en las distintas configuraciones posibles de estos.

Estos son sistemas de refrigeración que utilizan baja temperatura y funcionan mediante un ciclo abierto, es decir, el refrigerante que se utiliza (normalmente agua) se desecha una vez utilizado. De este modo es necesario un flujo continuo de refrigerante. El COP de estos sistemas no es muy elevado, se encuentra ente 0.3 y 0.6, dependiendo de la tecnología y el material desecante utilizado.

El funcionamiento básico de estos comienza en el *punto 1* con una toma de aire del exterior con unas ciertas condiciones de humedad y temperatura, el cual se hace pasar por la rueda desecante y se deshumidifica mediante un sólido o un líquido desecante (*punto 2*). Al pasar por la rueda también aumenta su temperatura, siendo esto un efecto indeseado por lo que, posteriormente, es enfriado por intercambiador de calor en la llamada *rueda de recuperación* donde el aire seco entrante se enfría sensiblemente dando lugar a un aire con el mismo contenido en humedad pero a menor temperatura.

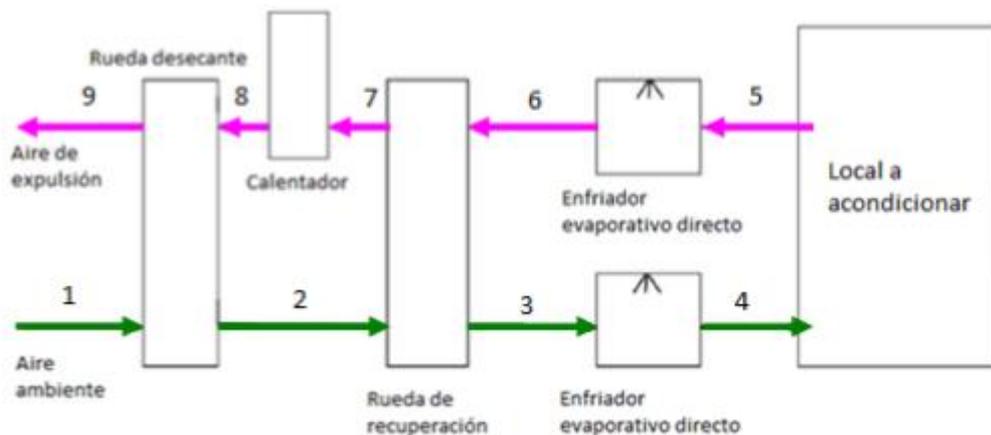


Figura 19: Ciclo de refrigeración con ruedas desecantes [18]

Una vez llegados a este punto *punto 3* de la *Figura 19* se hace pasar el aire por el enfriador evaporativo directo, donde el aire proveniente de la rueda de recuperación alcanza las condiciones de humedad y temperatura requeridas para acondicionar debidamente el espacio deseado en el *punto 4*.

El aire tratado obtiene calor del aire que se encuentra en la habitación, y sale de ella en las condiciones del *punto 5* para pasar de nuevo por un enfriador evaporativo directo enfriando de nuevo el aire. El objetivo de este segundo enfriamiento es conseguir en el *punto 6* las condiciones necesarias del aire a la entrada del intercambiador de calor que hace posible el preenfriamiento del aire del ambiente, mencionado anteriormente. Debido a este preenfriamiento el aire que se encontraba en las condiciones del punto 6

aumentará su temperatura sensiblemente hasta el *punto 7*, y se hará pasar por el calentador para alcanzar las condiciones óptimas del aire para realizar correctamente el proceso de regeneración del desecante. Estas dependerán de la sustancia utilizada en el proceso (*punto 8*).

El calentador puede ser alimentado con calderas o bombas de calor ente otros, pero en este proyecto se persigue la idea de la alimentación mediante el uso de energía solar gracias a un fluido caloportador proveniente de los captadores solares, aprovechando así la radiación solar, reduciendo emisiones contaminantes y el consumo eléctrico de la instalación. La regeneración se lleva a cabo con aire caliente a partir de 50-60°C, lo suficientemente bajo para que el calor lo pueda suministrar un capador solar plano.

Por último el aire sale de nuevo al ambiente en las condiciones del *punto 9*.

Se dispone a continuación en la *Figura 20* de un diagrama psicrométrico del ciclo completo para una mejor comprensión del proceso.

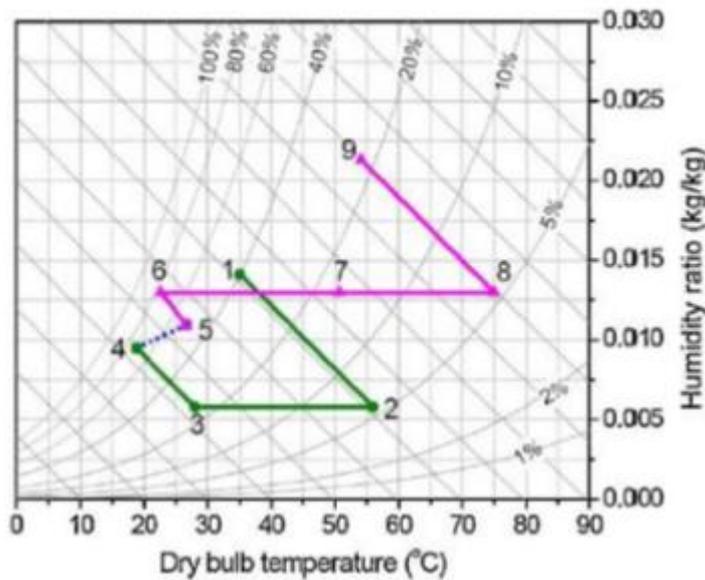


Figura 20: Diagrama psicrométrico [18]

Puede darse el caso de que para aplicar este tipo de sistemas en zonas de humedad extrema se tengan que aplicar disposiciones especiales como dos ruedas desecantes, realizar la desecación en dos etapas, o usar este sistema con sistemas de enfriamiento tradicionales de compresión. Esta última opción será útil cuando la deshumidificación no sea lo suficiente como para permitir el enfriamiento evaporativo del aire aunque hay numerosos estudios [19] que demuestran el buen rendimiento de este tipo de sistemas en climas húmedos.

Para el uso de este tipo de sistemas en modo calefacción, cuando la demanda no sea muy alta bastará con la deshumidificación del aire, en la que se producirá un calentamiento de este. Si las condiciones son más extremas puede usarse el sistema auxiliar de calentamiento usando la energía obtenida de los captadores solares [13].

2.2.2.1. Influencia de las variables de operación y condiciones ambiente

Las principales variables que afectan de manera importante al dimensionado y al rendimiento del sistema son: la humedad y temperatura del aire de proceso (aire de impulsión), la velocidad del aire a través de la rueda desecante, la temperatura del aire de regeneración y, por último, la cantidad de desecante expuesto a la corriente de aire.

- ***Humedad del aire de proceso:*** manteniendo las demás variables constantes, cuanto menos sea la humedad del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante, menor será también a la salida. Si la humedad del aire de entrada a la rueda es mayor que la de diseño, el aire saldrá de la rueda a una temperatura mayor de la esperada y deberá sufrir un enfriamiento mayor. Si la humedad es menor que la de diseño, ocurre lo contrario.
- ***Temperatura del aire de proceso:*** manteniendo las demás variables constantes, para temperaturas mayores del aire de entrada, mayor será la humedad de salida. Esto se debe a que el rendimiento de la rueda se ve reducido al aumentar la temperatura del aire del proceso. Sin embargo, una mayor temperatura del aire del proceso da lugar a un mayor enfriamiento para alcanzar la rueda deseada.
- ***Velocidad del aire de proceso:*** cuanto menor sea la velocidad del aire al atravesar la rueda de desecación, mejor será el rendimiento de esta y menor la humedad a la salida. En contraposición, velocidades más lentas del aire significan ruedas más grandes y con un coste mayor.
- ***Temperatura del aire de regeneración:*** esta temperatura es muy importante en el proceso ya que, cuanto mayor sea esta más fácil será el proceso de regeneración del desecante. Esta temperatura depende del intercambio de calor con el agua calentada en los captadores solares. Dicha temperatura es un parámetro esencial en el diseño de la instalación solar del sistema (captadores, acumulación y calentador auxiliar). No son necesarias altas temperaturas para la regeneración del desecante. Rondan los 60-85°C.
- ***Cantidad de desecante expuesto a la corriente de aire:*** cuanto mayor sea la cantidad de desecante disponible para secar el aire en un periodo de tiempo fijo, mayor será la capacidad de eliminación de humedad, pero también aumentará la energía necesaria para regenerarlo. Una mayor cantidad de desecante es posible si se aumenta la profundidad de la rueda o si se aumenta la velocidad de la rueda de rotación de esta. Ambas soluciones traen consigo un aumento de la temperatura del aire a la salida de la rueda, y en consecuencia una mayor cantidad de energía para enfriar dicha corriente.

2.2.2.2. Descripción de los elementos del sistema

A continuación se pasa a la descripción de cada elemento mencionado del sistema según el recorrido del aire en el proceso.

A. Rueda desecante

Existen otros sistemas de desecación aparte de la rueda desecante pero se prestará atención al uso de esta tecnología ya que es el elemento más extendido dentro del mercado actual para este tipo de sistemas de refrigeración.

La función de la rueda desecante es la de extraer la humedad del aire del proceso, para así optimizar el proceso de enfriamiento evaporativo. La sustancia desecante se impregna en una estructura soporte que puede estar compuesta de algún material corrugado de fibra de vidrio o algunos tipos de materiales compuestos de cerámica de acanalados.

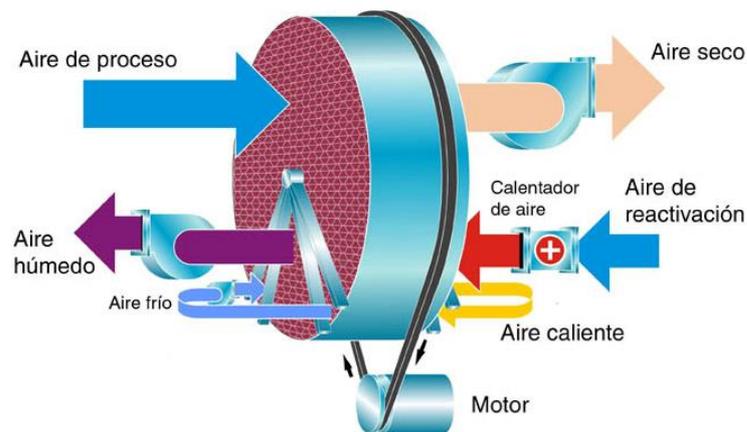


Figura 21: Esquema de rueda desecante [20]

Como se puede ver en la *Figura 21* la sección transversal de la rueda desecante se divide en aire de procesamiento y aire de regeneración mediante unas pequeñas tablillas que suelen repartirse en una proporción 3:1, siendo la mayor superficie para el tratamiento del aire de procesamiento. Esta desecación se puede realizar en un solo paso o en varios, quedando la rueda entonces dividida en más secciones. Mientras la rueda mantiene constante la rotación, el aire proveniente del exterior es forzado a pasar por la zona limitada a ella mediante las tablillas ya mencionadas, donde el aire pierde humedad ganándola el desecante a la vez que se satura.

Al mismo tiempo el aire de regeneración se hace pasar por la zona delimitada para ello, regenerándose así el desecante mediante la energía solar.

B. Desecantes

La sustancia desecante es la parte fundamental de la rueda. Es la encargada de remover la humedad del aire introducido que gracias a su gran afinidad con el agua adsorbe (desecantes sólidos) o absorbe (desecantes líquidos) el vapor de agua contenido en el aire ambiente. El desecante que se estudiará en este caso será el

deseccante sólido ya que estos son más utilizados que los desecantes líquidos, estando estos últimos en fase de investigación hasta hace relativamente pocos años.

A la hora de escoger el material desecante hay que tener en cuenta diversas variables ya que la eficiencia de deshumidificación de estos varía con la temperatura del aire de regeneración, el aire de procesamiento y la humedad. Además debe poseer una alta capacidad adsorbente y capacidad de ser regenerado con facilidad.

La factibilidad de los sistemas de enfriamiento evaporativo con desecantes se basa en el bajo coste y la eficiencia de los materiales desecantes, así es que gran cantidad de estudios están buscando cada vez más materiales compuestos que hagan más eficiente este tipo de sistemas [21].

El proceso de adsorción que sufre un desecante queda reflejado en la *Figura 22*, donde se puede ver como al aumentar el contenido de humedad de la sustancia desecante, va aumentando la presión de vapor en la superficie del desecante en el proceso 1-2, luego se regenera suministrándole aire caliente que remueve la humedad en el proceso 2-3, y finalmente se enfría en el proceso 3-1.

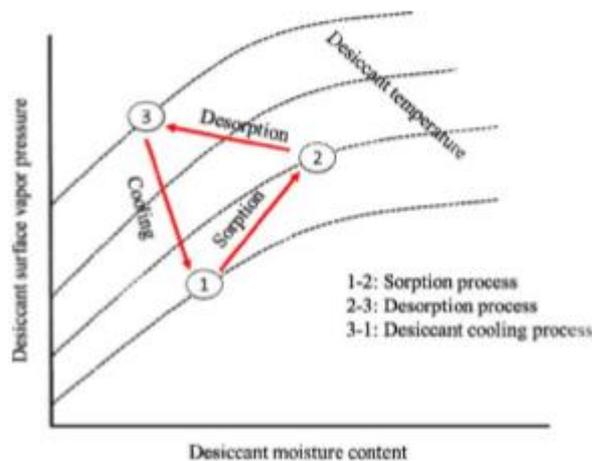


Figura 22: Proceso de deshumidificación y regeneración de desecante (Fuente: M. Mujahid et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews 45)

Las sustancias desecantes más usuales son carbón activado, alumina activada, zeolita y gel de sílice entre otros compuestos ya menos comunes. Se pasa a explicar brevemente estas sustancias.

Compuestos basados en el gel de sílice

El gel sílice es el compuesto más comúnmente usado como material desecante, debido a su bajo coste y a su baja temperatura de regeneración. Es un mineral natural que se purifica y procesa en forma granular o de perlas con estructura amorfa microporosa.

Muchos materiales compuestos basados en gel sílice están siendo desarrollados, y han demostrado que tienen mejores propiedades que el gel sílice puro, es el caso de compuestos de gel de sílice impregnados con una solución saturada de LiCl, que han demostrado tener una capacidad de absorción de 2 a 3 veces superior a la del gel de sílice puro [22].

Carbón activado

El carbón activado es otra de las sustancias ampliamente usadas como desecante sólido debido a su alto volumen y gran área superficial. Según reflejan algunos estudios [23] en determinadas ocasiones el carbón activado puede tener 2-3 veces más capacidad de adsorción del vapor de agua que el gel de sílice.

Zeolita sintética

Este compuesto puede adsorber la humedad fuertemente pero suele tener capacidades de adsorción menores al del de sílice y la alumina, por lo que solo se suele usar en aquellos lugares donde este disponible a bajo costo.

Alumina activada

Este compuesto se consigue a partir de Hidróxido de Aluminio y posee un alto nivel de porosidad. Es usado tanto como desecante como filtro retenedor de flúor (F), arsénico (As) y selenio (Se) en agua potable.

C. Rueda de recuperación

Es un recuperador rotativo en el que se aprovecha la temperatura del aire que va a ser expulsado para preenfriar el aire de entrada al enfriador evaporativo.

Esta constructivamente constituido por una carcasa en cuyo interior gira un tambor generalmente accionado mediante un motor eléctrico. El interior del tambor se encuentra constituido por material de relleno permeable al aire, con gran superficie de contacto y resistente a la abrasión. Los flujos de aire de renovación y de expulsión están separados de manera que circulan adyacentemente y en contracorriente. La eficiencia de los intercambiadores de este tipo esta en torno a 65-70%.

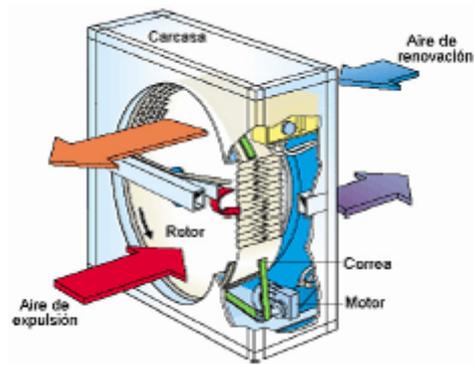


Figura 23: Recuperador rotativo (Fuente: Instalaciones y eficiencia energetica.com)

D. Enfriador evaporativo

El enfriamiento evaporativo se basa en el fenómeno natural que se origina cuando se ponen en contacto agua y aire, y en el cual se produce un descenso en la temperatura del aire al producirse la evaporación del agua. En el proceso hay, por tanto, una transferencia de calor y masa en el cual tiene lugar una conversión de calor sensible a calor latente.

Los **enfriadores evaporativos directos** ponen en contacto directo el agua que se va a evaporar con el aire de procesamiento. Al entrar en contacto directo el agua y el aire, este último cede calor al agua reduciendo su temperatura a la vez que aumenta su humedad. Una de las características del acondicionamiento de aire con desecantes y refrigeración evaporativa es que se ejerce un buen control tanto de la temperatura del local a acondicionar, como de la humedad, factor que los tradicionales sistemas de acondicionamiento de aire no suelen tener en cuenta, pudiendo llegar a crear en ciertas ocasiones discomfort.

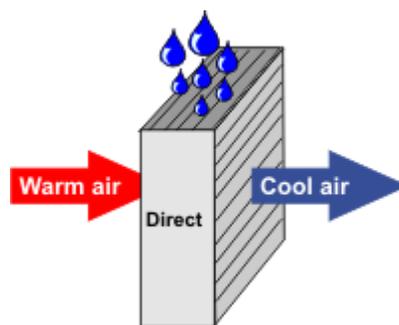


Figura 24: Enfriador evaporativo directo (Fuente: wecorhvac.com)

Dentro de los enfriadores evaporativos podemos encontrar varios tipos en función del medio de humectación, y que muy resumidamente son:

- De paneles evaporativos, compuestos de paneles de fibras generalmente tratadas químicamente, y que se montan en marcos que pueden ser de metal o de plástico.
- De medio rígido. El equipo sería similar al anterior sustituyendo las fibras por placas rígidas y corrugadas de plástico, fibra de vidrio, etc.
- Rotativos. Disponen de un medio de humidificación en forma de rueda, accionada por un motor, del mismo modo que el recuperador rotativo descrito con anterioridad.
- Pulverización directa. Con esto se consigue aumentar el contenido de humedad a través de la pulverización del agua en la corriente de aire a tratar. Estos dispositivos tienen una eficiencia muy elevada, pero tienen una serie de problemas como es el riesgo de contaminación por bacterias como la legionela, por lo que será necesario un debido mantenimiento.

En los **enfriadores evaporativos indirectos** la evaporación del agua se efectúa en una corriente secundaria de aire, que intercambia sensiblemente calor con la corriente de aire del proceso.

Este tipo de enfriador se utiliza especialmente en aquellas aplicaciones donde no se quiere aumentar el contenido de humedad en el aire del proceso. Además se evitan los riesgos de contaminación de este aire, ya que no se realiza la pulverización sobre esta corriente, aunque si habrá que tratar la corriente secundaria para evitar la contaminación con bacterias.

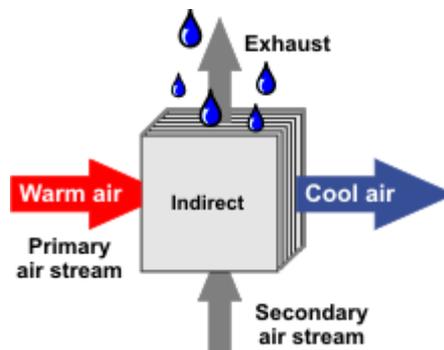


Figura 25: Enfriador evaporativo indirecto (Fuente: wescorhvac.com)

Se pueden encontrar enfriadores de este tipo con intercambiador tubular y con intercambiador de placas, siendo los últimos lo más usuales.

Puede darse una combinación entre ambos enfriadores directos e indirectos, a partir de la utilización de una serie de módulos secuenciales, que permiten compatibilizar las ventajas e inconvenientes de cada uno de los sistemas anteriores, consiguiendo así una mejora en el rendimiento ampliando las posibilidades de aplicación en climas húmedos.

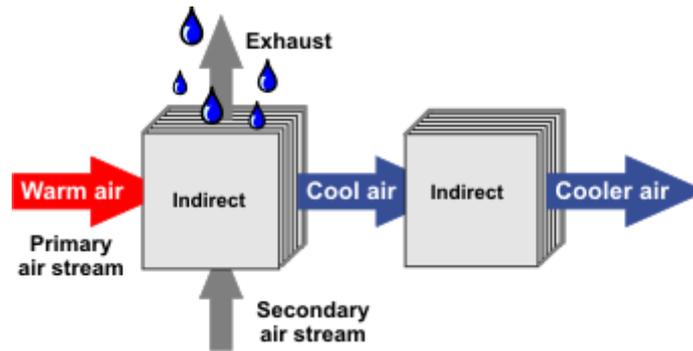


Figura 26: Enfriador evaporativo indirecto/directo (Fuente: wescorhvac)

E. Calentador

Será el elemento encargado de transmitir el calor suficiente al aire de retorno para que este alcance la temperatura necesaria para la regeneración del desecante. Es aquí donde aparece la energía solar en este tipo de sistemas gracias a la cual se reducen los costes de mantenimiento a la vez que se reducen las emisiones contaminantes. El calentador está alimentado con un fluido caloportador calentado a partir de la radiación incidente en los captadores, y que servirá para calentar el aire de retorno proveniente del local climatizado.

Este aire se hace pasar primero por la rueda de recuperación y posteriormente por el calentador, que no es más que un intercambiador de calor. Adicionalmente se puede disponer de un calentador auxiliar en cualquiera de las dos posiciones que se muestran en la Figura 27 para calentar el aire a la temperatura de regeneración del desecante, que variará según el utilizado.

Este modelo es mucho más sostenible que los sistemas con calderas de gas y queda expuesta la viabilidad del sistema en muchos estudios [24].

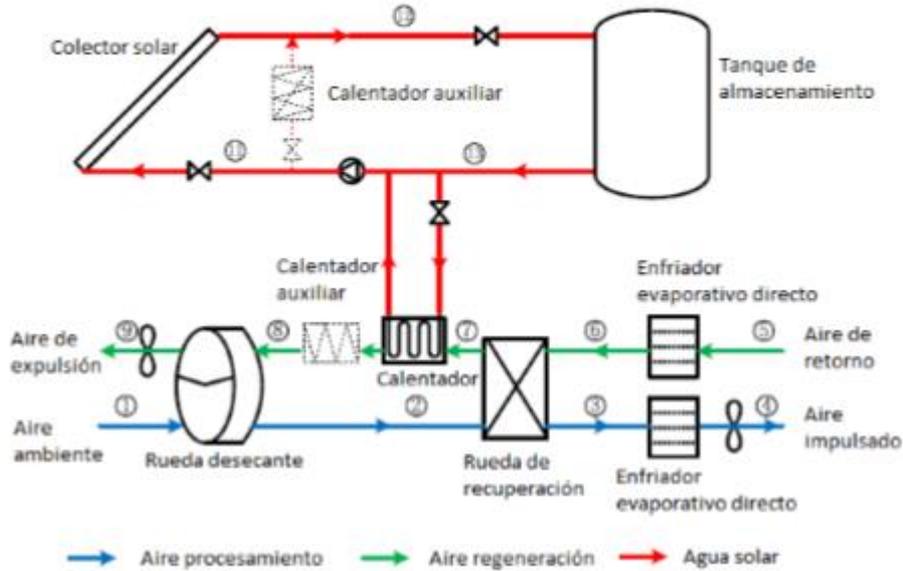


Figura 27: Calentador alimentado por energía solar [25]

A continuación se pasa a nombrar las ventajas e inconvenientes del uso de esta tecnología.

Ventajas

- Son sistemas muy compactos y los componentes necesarios son estándares.
- Trata de manera separada la carga latente y sensible, lo que permite un mejor control de las condiciones de confort.
- La temperatura que se ha de alcanzar en los captadores solares es menor que en otras aplicaciones, por lo que permite el uso de captadores más baratos.

Inconvenientes

- Este sistema está limitado para climas moderados. No es viable para climas con humedad alta.
- Son más pesados y ocupan más espacio en comparación con otros sistemas de refrigeración solar.
- Este tipo de sistema requiere de la instalación de conductos y equipos tanto para la entrada como para la salida de aire exterior.
- En general tienen un COP menor que otras tecnologías como la refrigeración por absorción.

3. INSTALACIONES

En este apartado se reúne una serie de instalaciones de climatización por energía solar existentes en diferentes países del mundo, agrupándolas según usen absorción, adsorción o ruedas desecantes. Se estudiarán los parámetros más significativos de cada una de las instalaciones que se describan a continuación.

Cabe destacar que las instalaciones escogidas no representan el 100% de las instalaciones existentes, habiendo elegido las que mostraban los datos que se iban buscando en este proyecto. De todas las encontradas se muestran en detalle algunas de ellas en este apartado.

Además, se sabe que la tecnología de absorción es la más usada, tal y como se ve en la *Figura 28*. En este caso se ha conseguido agrupar más de 90 instalaciones que usan absorción, frente a las menos de 10 que recurren a la adsorción o ruedas desecantes. Estas se pueden ver en los *Anexos 1.1, 1.2 y 1.3*.

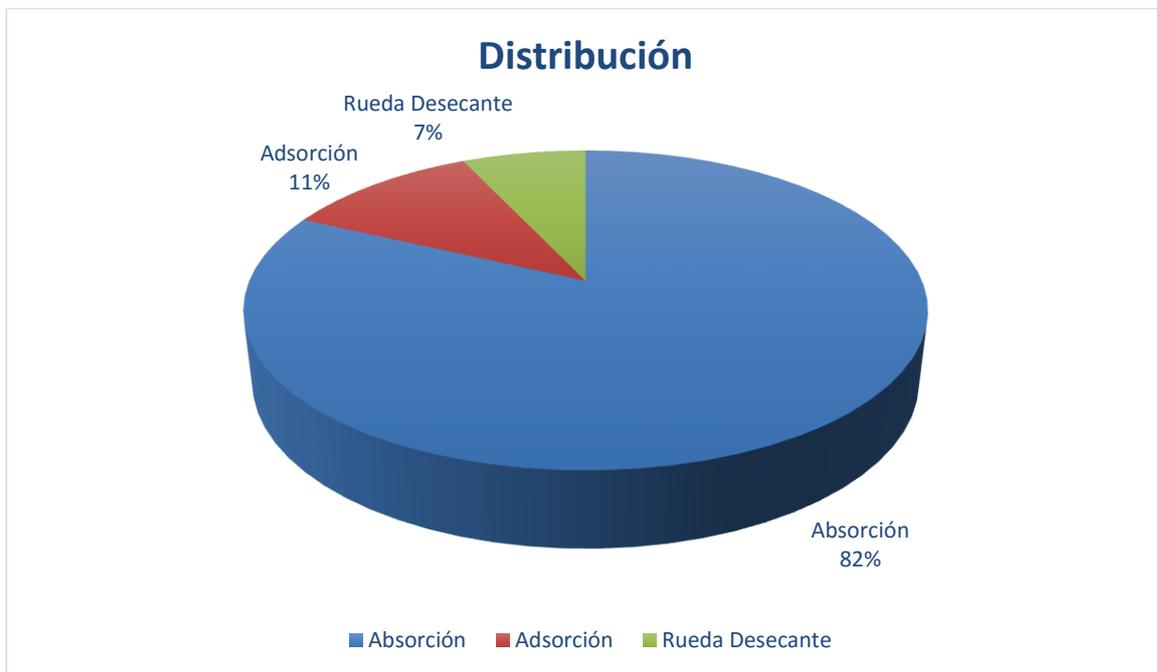


Figura 29: Distribución de las diferentes tecnologías

3.1. INSTALACIONES CON ABSORCIÓN

Se hará una selección intentando abarcar todas las posibilidades de tamaño y potencia, para ofrecer la máxima información y ser lo menos repetitivo posible.

3.1.1. DESERT MOUNTAIN HIGHT SCHOOL (ARIZONA)

La instalación con mayor área de captación y mayor potencia nominal de refrigeración se ha encontrado en Arizona, EEUU, con las siguientes características:

Tipo de edificio	Escuela
Localidad	Arizona, Estados Unidos
Año	2014
Tecnología de refrigeración	Absorción de simple efecto (LiBr- H_2O)
Capacidad de refrigeración	1 750 kW
Fabricante	Broad
COP	0.7
Tipo de captador	Captadores solares planos de alta eficiencia
Superficie de captación	4 865 m ²
Contribución a refrigeración	60-70%
Volumen de acumulación	34.5 m ³

Tabla 5: Instalación de refrigeración solar con absorción en Arizona, EEUU

Como se ha mencionado anteriormente, se trata de la mayor instalación de refrigeración solar que existe actualmente en el mundo. El colegio al que pertenece la instalación está situado en una de las zonas más calientes y con más radiación solar de EE.UU, pudiendo alcanzar los 43°C de temperatura ambiente en los meses de verano. Sin embargo, los meses en los que el colegio está operativo no son los meses de verano, necesitando así un sistema de refrigeración auxiliar para cubrir la demanda.



Figura 30: Vista de la superficie de captación del colegio Desert Mountain en Arizona [27]

Los más de 4 000 m² de captadores solares repartidos por las cubiertas de edificios y aparcamientos, calienta el agua hasta los 80°C para conducirla hasta la enfriadora de la firma Broad, encargada de producir frío. Existe también una torre de refrigeración, de 4 250 kW, necesaria para evacuar el calor producido en la absorción.

Gracias a este Sistema se ahorra un 60-70% de la electricidad total consumida en el colegio. Además, el sistema proporciona parte de la energía necesaria para calentar el ACS, ahorrando así en gas natural.

3.1.2. EDIFICIO FUNDACIÓN DE INDITEX ARTEIXO (A CORUÑA)

Se trata de una instalación que, teniendo una gran superficie de captación, ofrece una potencia nominal de refrigeración no demasiado elevada, tal y como se ve en la siguiente tabla.

Tipo de edificio	Oficinas y almacén
Localidad	A Coruña, España
Año	2004
Tecnología de refrigeración	Absorción de simple efecto (LiBr- H_2O)
Capacidad de refrigeración	170 kW
Fabricante	Carrier 16JB014
COP	0.6
Tipo de captador	Captadores planos de superficie selectiva
Superficie de captación	1 620 m ²
Contribución a refrigeración	15 %
Volumen de acumulación	30 m ³

Tabla 6: Instalación de refrigeración solar con absorción en Arteixo, España

Este edificio está dedicado principalmente a oficinas y una parte a almacén. Consta de dos plantas de 10 000 m² cada una. Se puede ver en la siguiente imagen cómo se disponen los captadores solares en la cubierta del edificio.



Figura 31: Vista de la superficie de captación del edificio fundación Inditex en Arteixo [27]

Inicialmente la instalación tenía dos bombas de calor y una enfriadora, ambas eléctricas, que garantizaban ACS a 55°C y refrigeración. Con la instalación solar implantada en 2004 se consiguió una importante reducción del consumo energético. Cuando el agua que está en los tanques supera los 55°C está disponible para ser enviada al colector de ACS. En verano, cuando la demanda de agua caliente es mucho menor, si el

agua de los tanques supera los 80°C esta será enviada a la máquina de absorción, para que la enfriadora trabaje con una carga menor.

Mediante la instalación se consigue un ahorro de cerca del 20% del consumo eléctrico total del edificio, además de reducirse las emisiones de CO_2 .

3.1.3. ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA (SEVILLA)

Se habla ahora de una instalación con una potencia nominal de refrigeración y un área de captación aceptables.

Tipo de edificio	Universidad
Localidad	Sevilla, España
Año	2008
Tecnología de refrigeración	Absorción de doble efecto
Capacidad de refrigeración	175 kW
Fabricante	Broad BZH15
COP	1.15
Tipo de captador	Concentradores lineales Fresnel
Superficie de captación	352 m ²
Contribución a refrigeración	-
Volumen de acumulación	-

Tabla 7: Instalación de refrigeración solar con absorción en la ETSI de Sevilla, España



Figura 32: Vista de la superficie de captación de la ETSI, Sevilla [28]

En el año 2008 la compañía energética Gas Natural puso en marcha una instalación piloto de refrigeración solar en colaboración con la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, contando con la financiación de Corporación Tecnológica de Andalucía.

El objetivo principal de esta infraestructura, la primera de Europa en utilizar concentradores Fresnel y una máquina de absorción de doble efecto, fue la de disponer de una herramienta de estudio que permitiese establecer los parámetros técnicos, económicos y medioambientales del diseño de este tipo de instalaciones. Además de disponer de una instalación de referencia que pueda demostrar la viabilidad técnica de esta aplicación.

El edificio cuenta con 352 m² de concentradores lineales Fresnel, situados en la cubierta, que aprovechando la radiación solar calientan el agua hasta 180°C. Si la temperatura excede los 190°C

3.1.4. HOSTPITAL MOOT (PRETORIA)

Tipo de edificio	Hospital
Localidad	Pretoria, Sudáfrica
Año	2009
Tecnología de refrigeración	Absorción de simple efecto (LiBr-H ₂ O)
Capacidad de refrigeración	35 kW
Fabricante	Yazaki serie WFC-SC10
COP	0.65
Tipo de captador	Tubo de vacío (52)
Superficie de captación	200 m ²
Contribución a refrigeración	50%
Volumen de acumulación	6 m ³ (x2)

Tabla 8: Instalación de refrigeración solar con absorción en Pretoria, Sudáfrica

Es el primer Sistema de refrigeración solar instalado en Sudáfrica. Esta instalación tiene un COP superior a aquellas instalaciones instaladas en Europa, ya que el clima es ideal para este tipo de instalaciones por su gran número de horas en los que se aprecia el Sol y el alto valor de irradiación diaria que posee Sudáfrica.

Consta de 52 tubos de vacío capaces de calentar el agua hasta los 100°C aproximadamente para posteriormente enviarla hasta el sistema de almacenamiento, hacia los dos tanques de 6 m³, si no fuese necesario su uso inmediato en el enfriador por absorción. Este sistema solar de refrigeración está

acompañado de un sistema de refrigeración auxiliar que se encarga de abastecer la refrigeración cuando la energía solar no es suficiente, o la demanda supera lo esperado.

El primer año de funcionamiento se consiguió ahorrar un 60% de electricidad, consiguiendo aumentar este ahorro los años siguientes.

3.2. INSTALACIONES CON ADSORCIÓN

En este apartado se hará la misma selección que en el anterior.

3.2.1. ALMACÉN FARMACÉUTICO, PROYECTO MEDICOOL (MURCIA)

Es la instalación de refrigeración solar con adsorción con mayor superficie de captación que se ha podido encontrar. Se trata de:

Tipo de edificio	Almacén farmacéutico
Localidad	Santomera, Murcia, España
Año	2014
Tecnología de refrigeración	Adsorción
Capacidad de refrigeración	1 210 kW
Fabricante	-
COP	0.6
Tipo de captador	Tubo de vacío
Superficie de captación	3 600 m ²
Contribución a refrigeración	100%
Volumen de acumulación	-

Tabla 9: Instalación de refrigeración solar con adsorción de un almacén farmacéutico en Murcia, España

El proyecto Medicool, desarrollado entre 2011 y 2014, ha demostrado la implementación efectiva de una planta de frío solar por adsorción capaz de satisfacer las necesidades de climatización de un almacén de productos farmacéuticos.

El sistema consta de dos máquinas de adsorción, una de 535 kW y la otra de 675 kW, que cubren la demanda de refrigeración del almacén de 22 500 m². Los captadores solares producen la energía necesaria para el funcionamiento de ambas. En primer lugar, cuando la temperatura del agua supera los 60°C, la máquina de adsorción de menor tamaño empieza a funcionar. Para la máquina de mayor potencia será necesario alcanzar temperaturas superiores a los 75°C.

Además de la adsorción existe una enfriadora convencional por si la radiación solar no es suficiente para climatizar el almacén y mantener la temperatura deseada. También se encuentran dos torres de refrigeración de 844 kW cada una.

Los beneficios sociales y medioambientales son numerosos. Gracias al uso de la refrigeración solar se consiguen evitar la emisión de 950 toneladas de CO_2 anualmente.

3.2.2. HOSPITAL UNIVERSITARIO DE FRIBURGO (FRIBURGO)

Tipo de edificio	Laboratorios
Localidad	Friburgo, Alemania
Año	1999
Tecnología de refrigeración	Adsorción
Capacidad de refrigeración	70 kW
Fabricante	Nishiyodo
COP	0.6
Tipo de captador	Tubos de vacío
Superficie de captación	230 m ²
Contribución a refrigeración	32 %
Volumen de acumulación	6 m ³

Tabla 10: Instalación de refrigeración solar con adsorción del hospital universitario de Friburgo, Alemania

En este hospital universitario de Friburgo se encuentran varios laboratorios, pero es sólo uno de ellos el que se climatiza mediante energía solar por adsorción. El área total refrigerada es de aproximadamente 360 m². Dispone de dos sistemas de ventilación de caudal variable que emplean intercambiadores de flujo cruzado para intercambiar energía. En época calurosa, el aire se enfría con el agua fría que proporciona la máquina de adsorción, pudiendo alcanzar el aire una temperatura de 18°C.

La amplia superficie de captadores solares proporcionan calor para la máquina de adsorción en la estación estival y en invierno para calentar la renovación del aire. Además incorpora un depósito de 6 000 litros para agua caliente. Si la temperatura del depósito es menor que la necesaria, el calor necesario lo proporciona la red de vapor del hospital.

Según las medidas tomadas en el año 2002, el rendimiento de la máquina en los días de verano rondaba el valor de 0.6.

Con este concepto de sistema en el que se utiliza de manera constante la red de vapor existente en el hospital, se reducen las cargas máximas tanto en consumos de vapor como en electricidad en los periodos de máxima demanda.

3.2.3. RESTAURANTE EN EL ISE DE FRIBURGO (FRIBURGO)

Esta instalación se caracteriza por tener un área y potencia reducida.

Tipo de edificio	Restaurante
Localidad	Friburgo, Alemania
Año	2007
Tecnología de refrigeración	Adsorción
Capacidad de refrigeración	7.5 kW
Fabricante	Sortech
COP	0.44
Tipo de captador	Captadores de placa plana
Superficie de captación	22 m ²
Contribución a refrigeración	30%
Volumen de acumulación	2 m ³

Tabla 11: Instalación de refrigeración solar con adsorción en Shanghai, China

En el año 2007, con la intención de disminuir el consumo por refrigeración del restaurante situado en el Instituto de Energía Solar (ISE) de Friburgo, se instaló un sistema de refrigeración solar por adsorción para acondicionar una zona de 45 m².

Se instalaron 22 m² de captadores solares de placa plana en la cubierta del edificio, los cuales, utilizan la energía solar, consiguen calentar el agua hasta una temperatura de unos 75°C. Si la radiación fuese insuficiente para el abastecimiento demandado, una caldera se encarga de calentar el agua. La máquina de adsorción es alimentada con el agua caliente, produciendo agua fría a 10°C.

El Instituto de Energía Solar es un ejemplo de eficiencia energética, ya que su consumo en climatización en la mayoría de las zonas es muy reducido gracias a las medidas de enfriamiento pasivo que componen el edificio.

Sin embargo, en zonas como el comedor o cocina, debido a las altas cargas internas es necesaria la refrigeración, que gracias al uso del sistema de adsorción, se consigue con un reducido consumo eléctrico.

3.3. INSTALACIONES CON RUEDAS DESECANTES

De este tipo de sistemas se encuentran escasas instalaciones, tal y como se puede ver en el *Anexo 1.3*. Se procede a analizar aquellas de las que se dispone más información.

3.3.1. CÁMARA DE COMERCIO DE FRIBURGO

Tipo de edificio	Sala de reuniones
Localidad	Friburgo, Alemania
Año	-
Tecnología de refrigeración	Rueda desecante con gel de sílice
Capacidad de refrigeración	60 kW
Fabricante	-
COP	0.43
Tipo de captador	Placa plana
Superficie de captación	100 m ²
Contribución a refrigeración	-
Volumen de acumulación	-

Tabla 12: Instalación de refrigeración con rueda desecante en Friburgo, Alemania

Se trata de una sala de reuniones y cafetería, refrigerada mediante un ciclo abierto con enfriamiento evaporativo y uso de desecante, aprovechando el calor obtenido de la radiación solar para regenerar la rueda desecante, que contiene gel de sílice como sustancia absorbente.

3.3.2. EDIFICIO DE INVESTIGACIÓN EN HARTBERG

Los datos energéticos de la instalación son los siguientes:

Tipo de edificio	Oficina
Localidad	Hartberg, Austria
Año	-
Tecnología de refrigeración	Rueda desecante con gel de sílice
Capacidad de refrigeración	20 kW
Fabricante	-
COP	0.6
Tipo de captador	Tubo de vacío
Superficie de captación	12 m ²
Contribución a refrigeración	0.6
Volumen de acumulación	2 m ³

Tabla 13: Instalación de refrigeración solar con rueda desecante en Hartburg, Austria

Este edificio situado en Austria, es el primer edificio con sistema de enfriamiento evaporativo con desecantes y fuente de energía renovable situado en el país. Aunque su uso habitual es para dar conferencias y seminarios, cuenta con una zona de oficinas.

En lo que al medio ambiente se refiere, el uso de calor solar y calor procedente de la biomasa reduce las emisiones de CO_2 en comparación con las que se producirían al usar combustibles fósiles.

4. ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES

Se muestra a continuación un análisis estadístico para ver la tendencia que siguen algunos parámetros de los que dependen directamente las instalaciones recogidas en el *Anexo I*, teniendo en cuenta el lugar donde se ubica la instalación, además del tamaño y su uso.

Se ha tomado como base el criterio llamado “Top-down” de carácter mixto (cualitativo y cuantitativo) el cual parte de la visión más global, analizando la tendencia mundial de las instalaciones solares de baja temperatura. Posteriormente, cada parte del sistema se refina aportando mayores detalles y restricciones. Cada parte nueva es entonces redefinida, cada vez con mayor detalle, hasta que se llega al punto deseado donde se pueda obtener conclusiones.

4.1. ABSORCIÓN

4.1.1. En función del tipo de captador

Predomina el uso de captadores solares planos y tubos de vacío, tal y como se muestra a continuación.

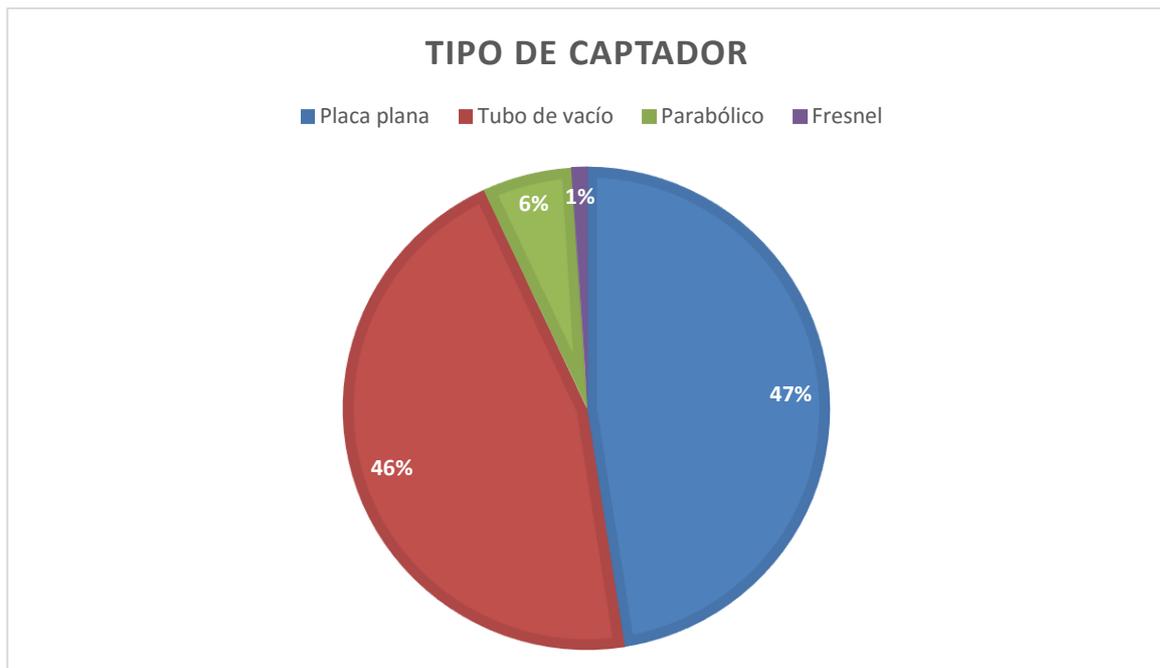


Gráfico 1: Distribución de las instalaciones de absorción según el tipo de captador

I. PLACA PLANA

Se compararán la superficie de captación, el volumen del acumulador y la potencia nominal de refrigeración de las instalaciones que utilizan placa plana como superficie de captación.

✚ *RATIO COMPARATIVO DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN Y LA POTENCIA NOMINAL DE REFRIGERACIÓN (m^2/kW)*

Se comienza con la visión global de esta tecnología:

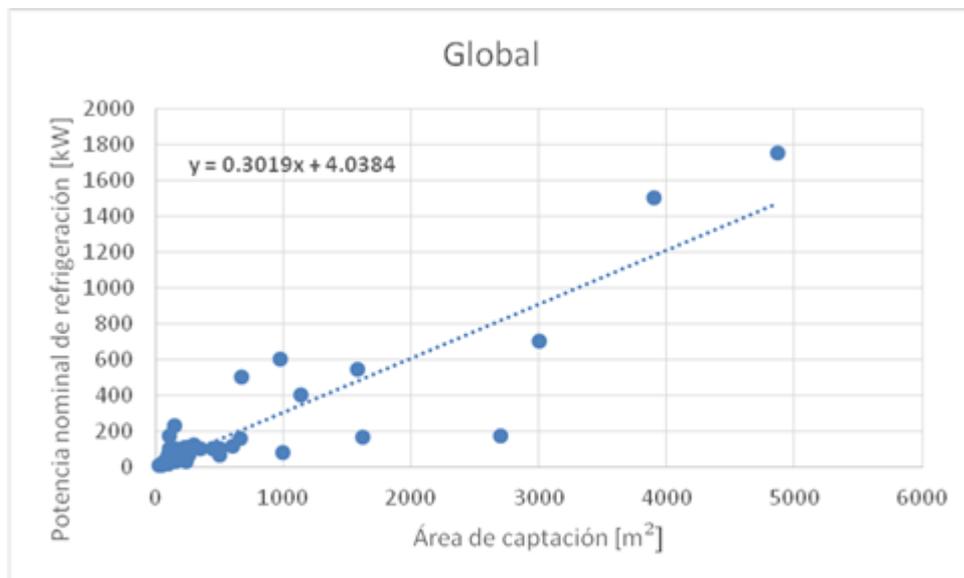


Gráfico 2: Ratio m^2/kW global con placa plana

Para una mejor visión de los datos, se descartarán las instalaciones que posean un área de captación demasiado grande en comparación con las demás, centrando la vista en aquellas cuya superficie no supera los $600 m^2$:

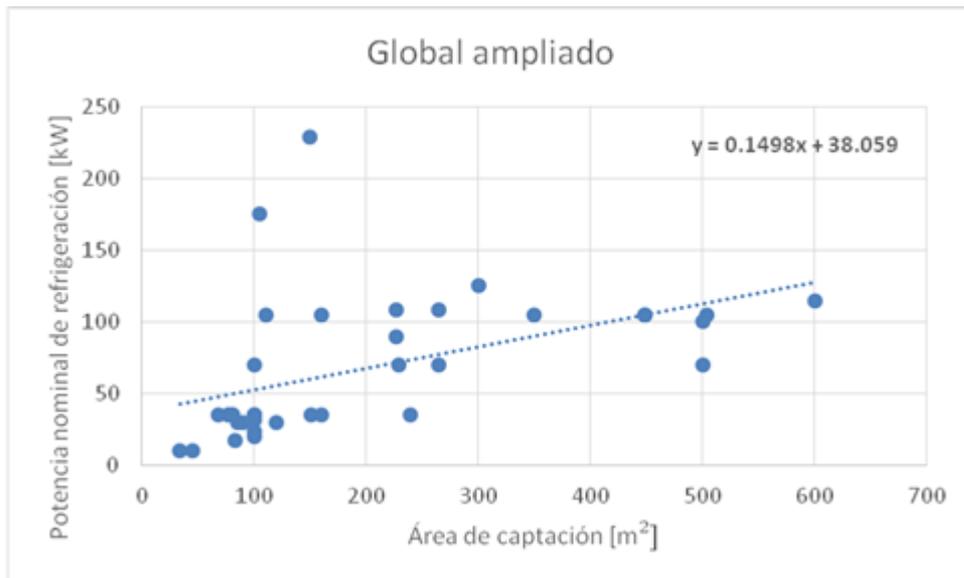


Gráfico 3: Ratio m^2/kW global con placa plana con superficies de hasta $600 m^2$

Se observa que la potencia máxima se da para un área de captación pequeña en comparación con las demás.

A continuación se estudiará cuál es el motivo y qué influencia tiene el clima de la situación de las instalaciones. Entrando más en detalle, se ha escogida la zona Europa como objeto de estudio, ya que es donde se localizan la mayor parte de las instalaciones encontradas. Se ha tomado como base el *mapa de Europa climático* que se muestra a continuación. Con todo ello, se procede a analizar más en profundidad este ratio en función del clima.



Figura 33: Mapa de Europa climático [29]

Europa se divide principalmente en los climas Oceánico y Mediterráneo.

- ***Clima Mediterráneo***

En esta zona se han incluido las instalaciones de los países de España, Italia, Grecia, Chipre y Portugal.

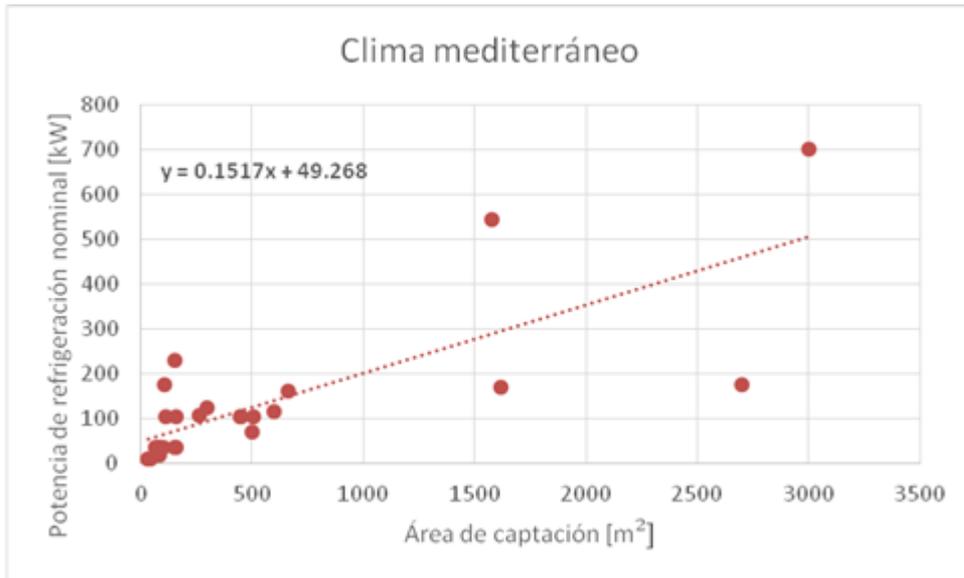


Gráfico 4: Ratio m^2/kW con placa plana en clima mediterráneo

Dado que la mayoría de instalaciones se concentran en valores del área de captación menor de $800 m^2$, se presta especial atención a estas, observando entonces:

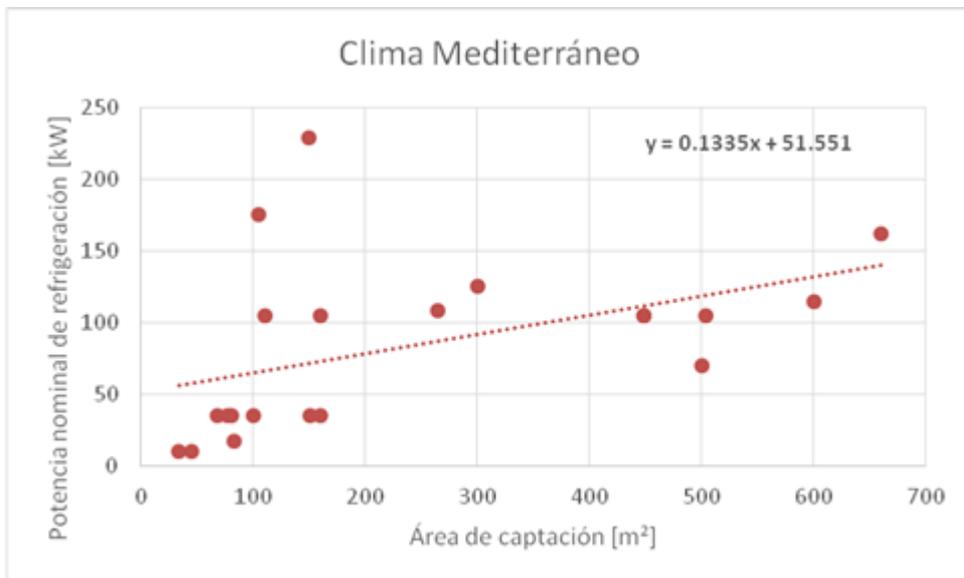


Gráfico 5: Ratio m^2/kW con placa plana en clima mediterráneo con áreas de captación menores de $800 m^2$

Se observa que en estos países no son necesarias instalaciones con una gran superficie de captación para obtener una potencia nominal de refrigeración razonablemente alta. Las más comunes rondan los $100-200 m^2$, estando el valor máximo de la potencia en un área de $150 m^2$. Las razones son las mismas que se mencionan en el capítulo introductorio.

▪ **Clima oceánico**

Formado por países como Alemania, Francia, Bélgica, Austria, Dinamarca y Kosovo.

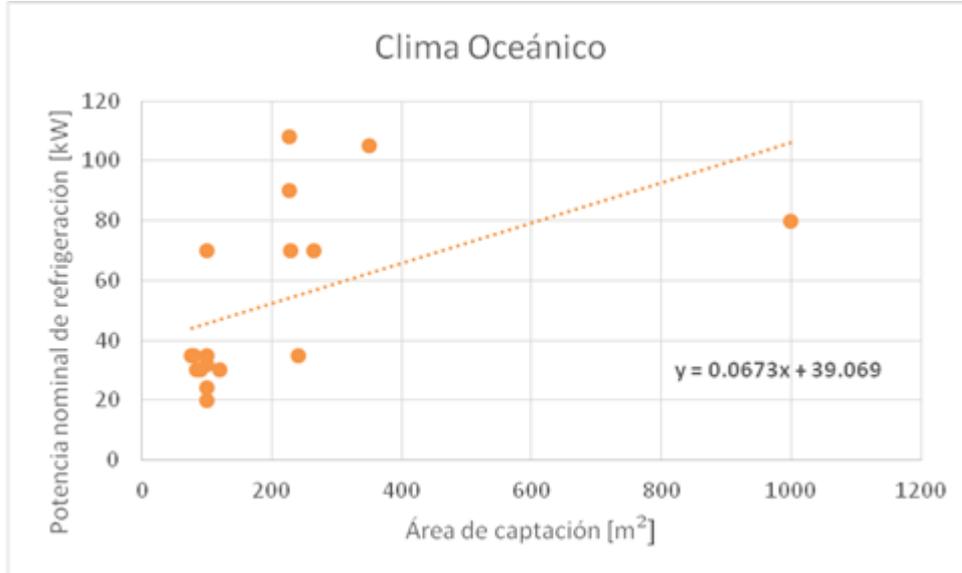


Gráfico 6: Ratio m^2/kW con placa plana en clima oceánico

Se centrará la atención en las instalaciones con un área de captación menor de $400 m^2$.

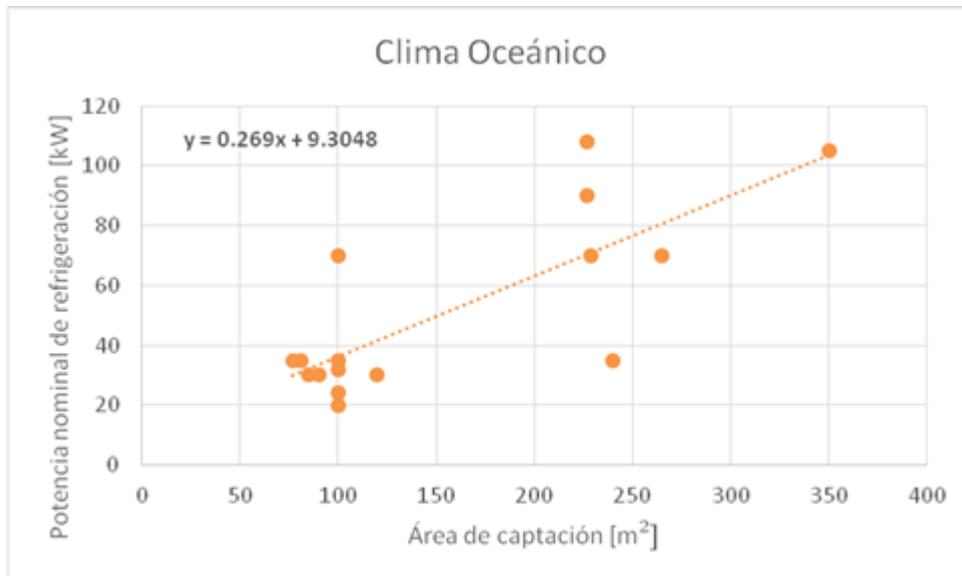


Gráfico 7: Ratio m^3/kW con placa plana en clima oceánico con áreas de captación menores de $400 m^2$

Se observa que la potencia máxima en este tipo de climas ronda los 150 kW con un área de captación de en torno $225 m^2$.

Cabe destacar la diferencia entre ambos climas, comparando este último con los casi 250 kW que se consiguen en el clima mediterráneo, necesitando casi 100 m^2 menos de área de placas planas.

✚ *RATIO COMPARATIVO DEL VOLUMEN DE ACUMULACIÓN Y LA POTENCIA NOMINAL DE REFRIGERACIÓN (m^3/kW)*

Se procede a seguir el mismo procedimiento que en el caso anterior, atendiendo primero a la curva global y posteriormente a grupos más reducidos.

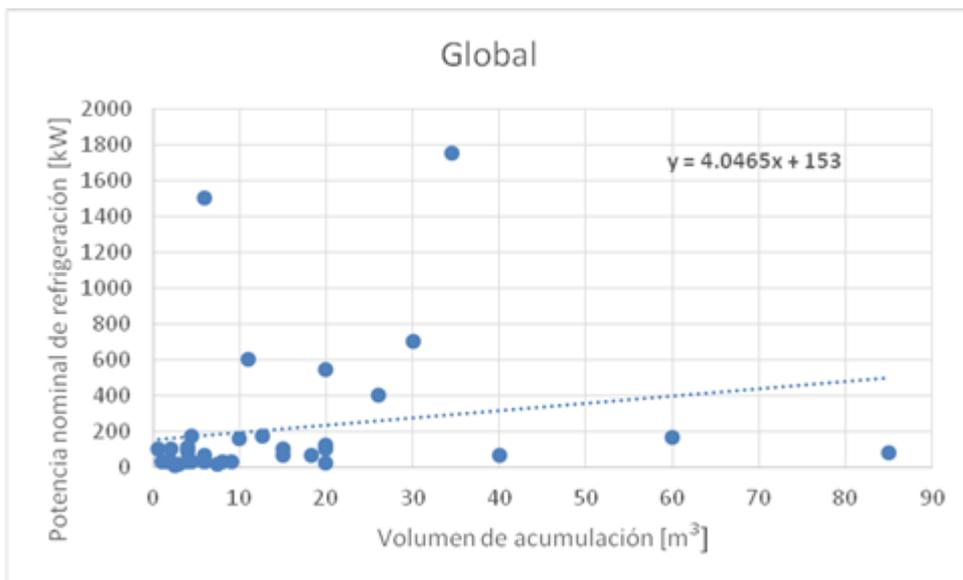


Gráfico 8: Ratio m^3/kW global con placa plana

Descartando aquellas cuyo volumen del acumulador supera los 40 m^3 :

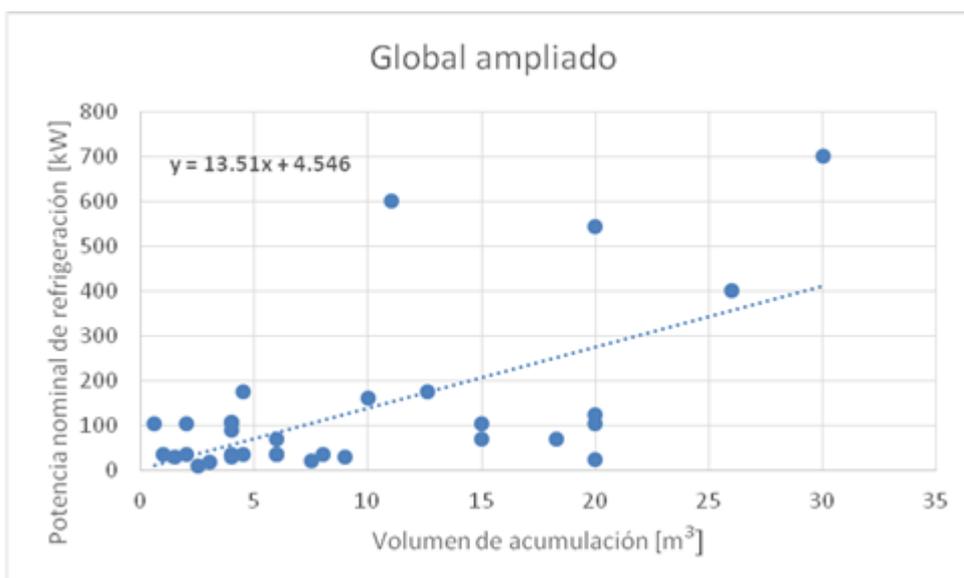


Gráfico 9: Ratio m^3/kW global con placa plana y volumen menor de 40 m^3

Siguiendo el mismo criterio que en el caso anterior:

▪ **Clima Mediterráneo**

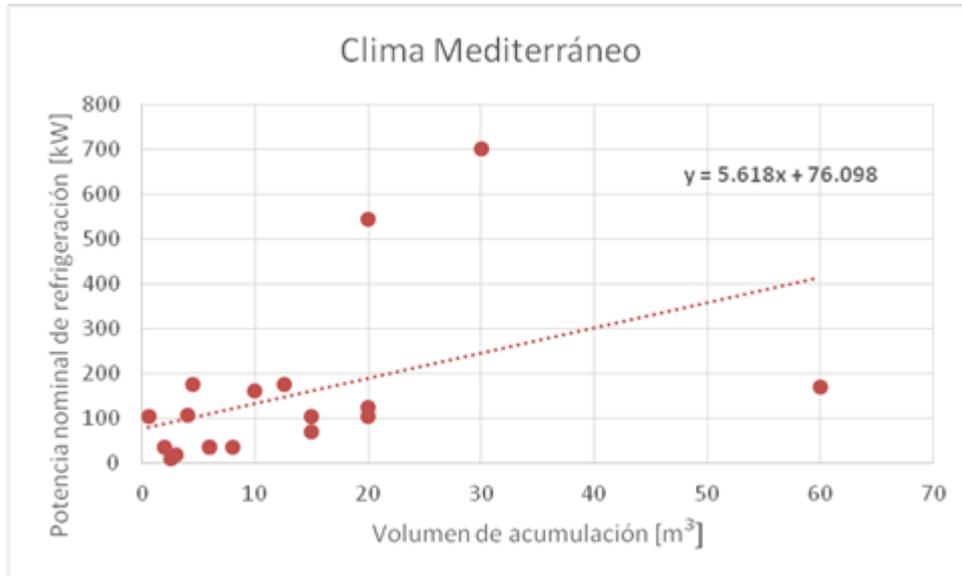


Gráfico 10: Ratio m^3/kW con placa plana en clima Mediterráneo

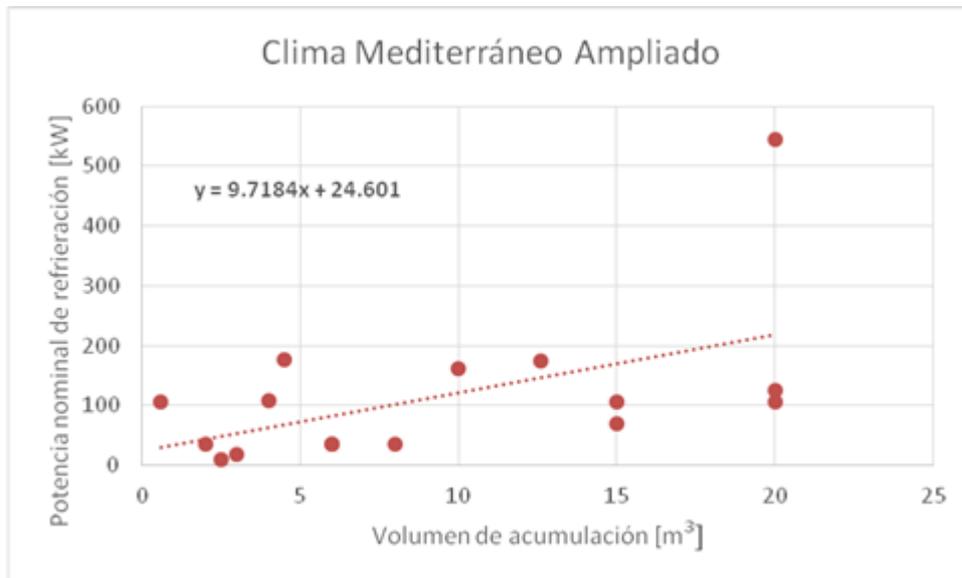


Gráfico 11: Ratio m^3/kW con placa plana en clima Mediterráneo con volumen de hasta 30 m^3

Se aprecia que la máxima potencia se da para un volumen de acumulador alto, aunque no es necesario un gran volumen para obtener una potencia aceptablemente alta.

- **Clima Oceánico**

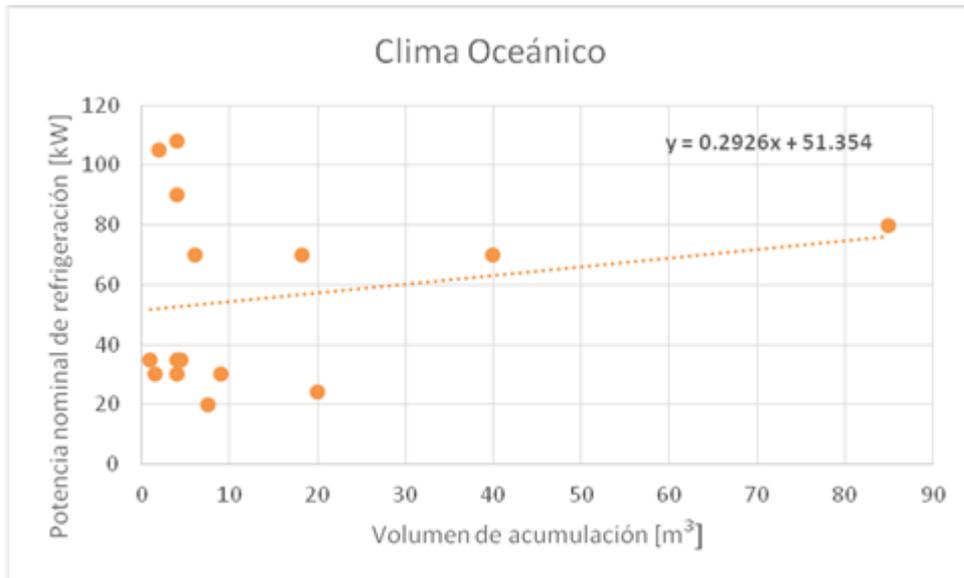


Gráfico 12: Ratio m^3/kW con placa plana en clima Oceánico

Descartando el punto que se aleja más:

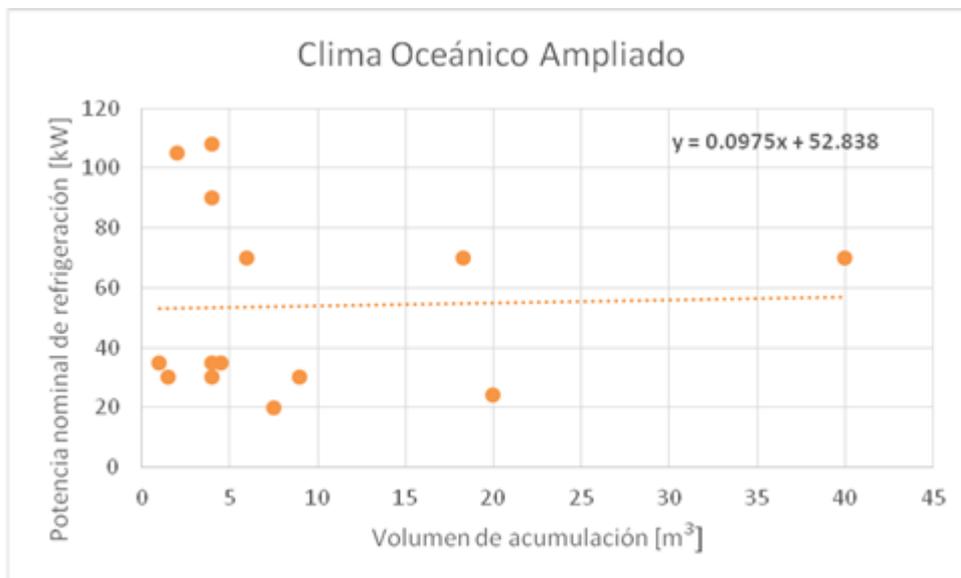


Gráfico 13: Ratio m^3/kW con placa plana en clima Oceánico para volúmenes reducidos

Se observa de nuevo cómo en los países con clima oceánico la potencia máxima que se puede dar es menor que los que se localizan en climas mediterráneos. Por otro lado, el volumen de acumulación que da la potencia máxima (en torno a 110 kW) en este tipo de clima es similar al volumen que daría esa potencia en el clima más caliente.

✚ *RATIO COMPARATIVO DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN Y EL VOLUMEN DE ACUMULACIÓN*
(m^2/m^3)

La primera visión global:

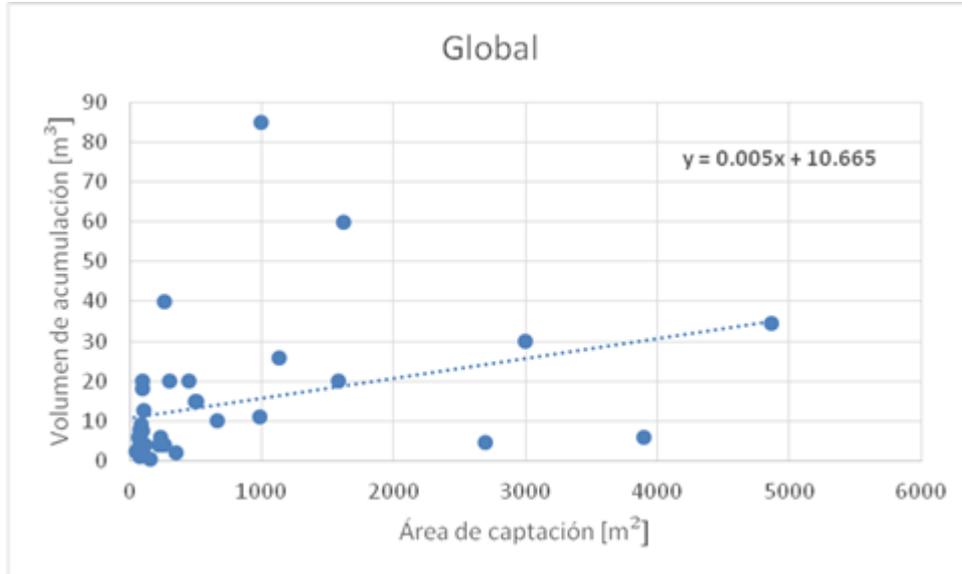


Gráfico 14: Ratio m^2/m^3 global con placa plana

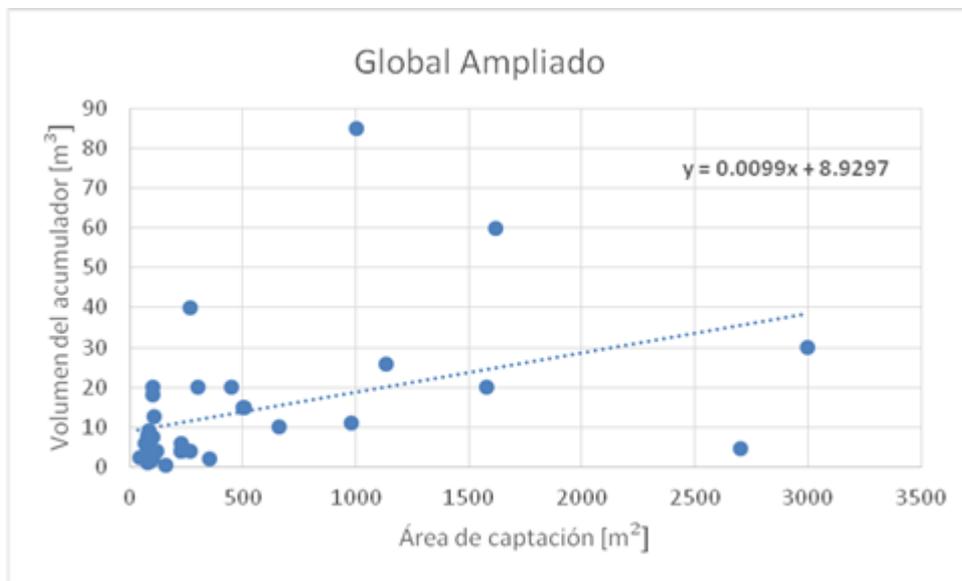


Gráfico 15: Ratio m^2/m^3 con placa plana ampliado

Se observa que la mayoría de los puntos se dan para valores de área y volumen relativamente bajos.

- **Clima Mediterráneo**

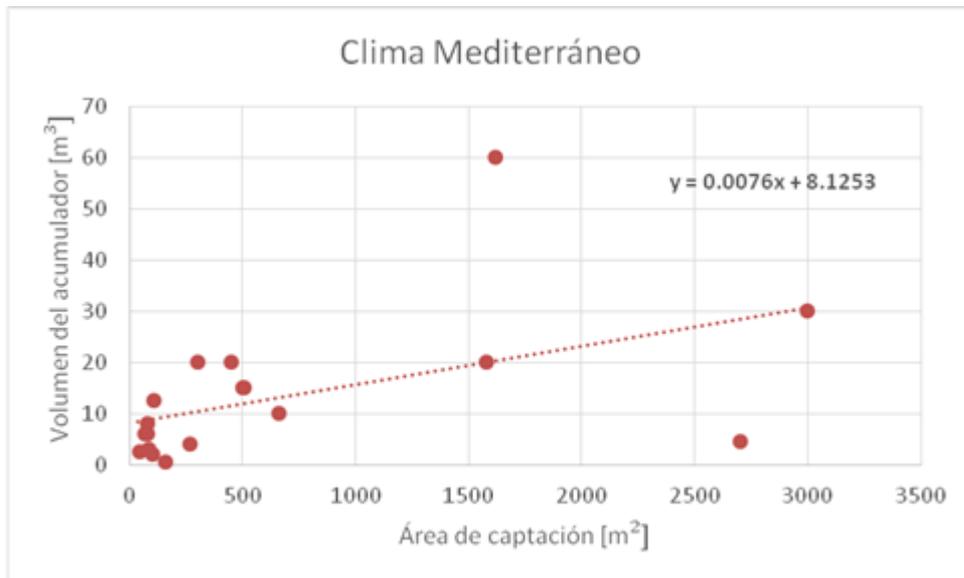


Gráfico 16: Ratio m^2/m^3 con placa plana en clima Mediterráneo

Se sigue una tendencia positiva y bien definida, a excepción de algunos puntos, pero se puede decir que un área de captación pequeña trae consigo un volumen de acumulación proporcional al mismo.

- **Clima Oceánico**

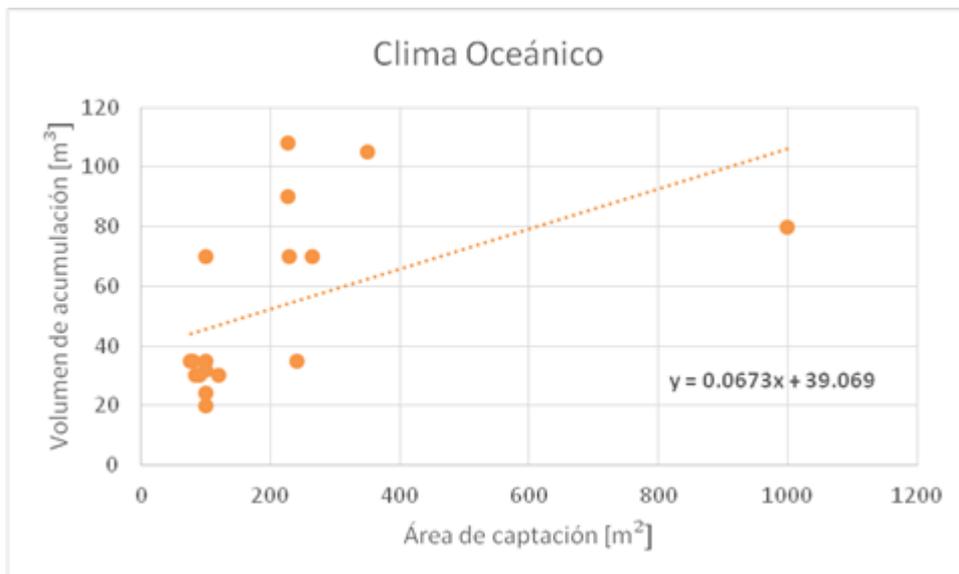


Gráfico 17: Ratio m^2/m^3 con placa plana en clima Oceánico

Se puede observar como el volumen de acumulación en climas oceánicos es mayor para áreas de captación más pequeñas que en las localidades con clima mediterráneo.

I. TUBO DE VACÍO

Se mostrarán a continuación unos ratios similares a los anteriores pero para captadores de tubo de vacío.

✚ *RATIO COMPARATIVO DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN Y LA POTENCIA NOMINAL DE REFRIGERACIÓN (m^2/kW)*

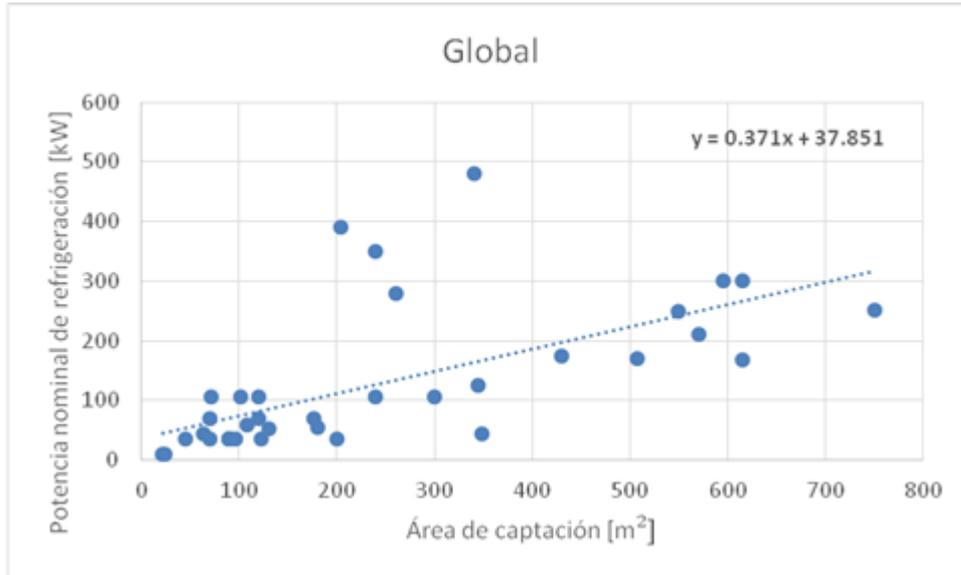


Gráfico 18: Ratio m^2/kW global con tubo de vacío

▪ *Clima Mediterráneo*

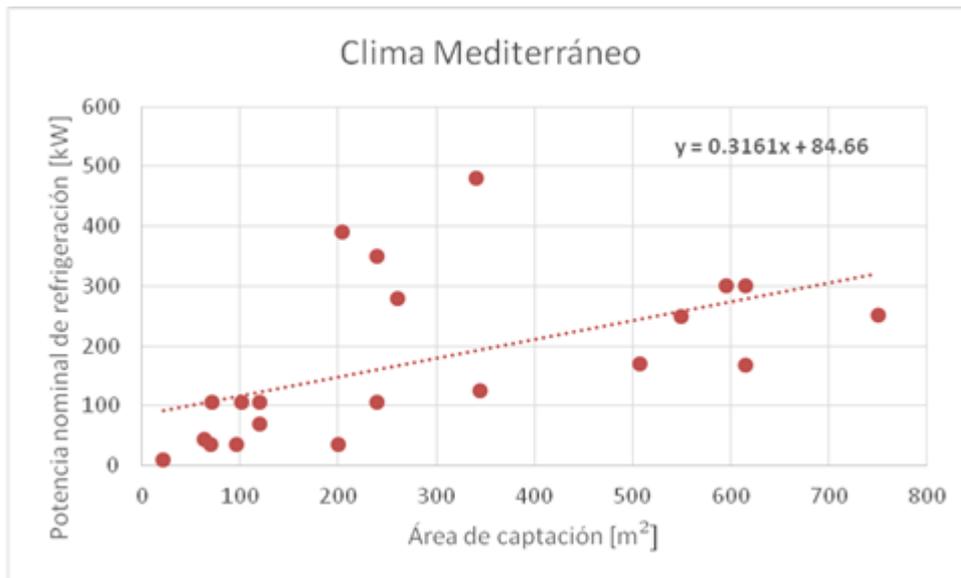


Gráfico 19: Ratio m^2/kW con tubo de vacío en clima Mediterráneo

Las instalaciones siguen, por lo general, una tendencia definida y positiva.

▪ **Clima Oceánico**

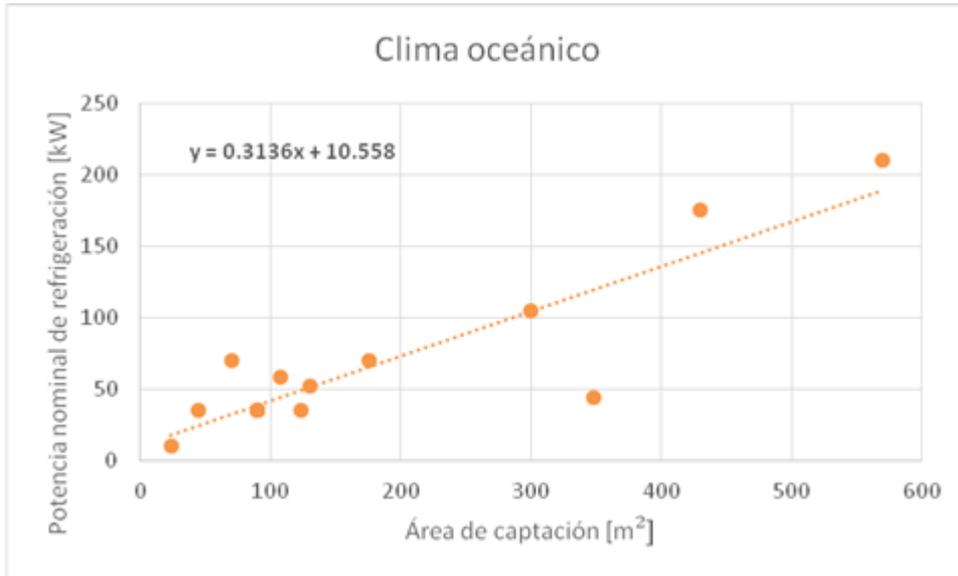


Gráfico 20: Ratio m^2/kW con tubo de vacío en clima Oceánico

Se observa que, al igual que con placa plana, en el clima mediterráneo se llegan a obtener mayores potencias de refrigeración con áreas de captación similares. A simple vista se podría decir que esta tecnología sigue una línea de tendencia más definida que la que usa placa plana.

✚ **RATIO COMPARATIVO DEL VOLUMEN DE ACUMULACIÓN Y LA POTENCIA NOMINAL DE REFRIGERACIÓN (m^3/kW)**

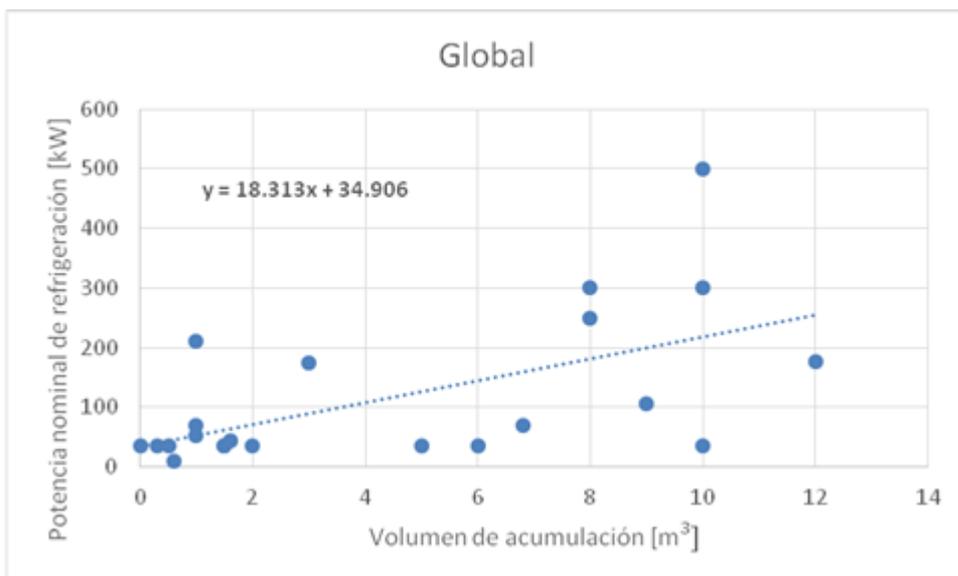


Gráfico 21: Ratio m^3/kW global con tubo de vacío

▪ *Clima Mediterráneo*

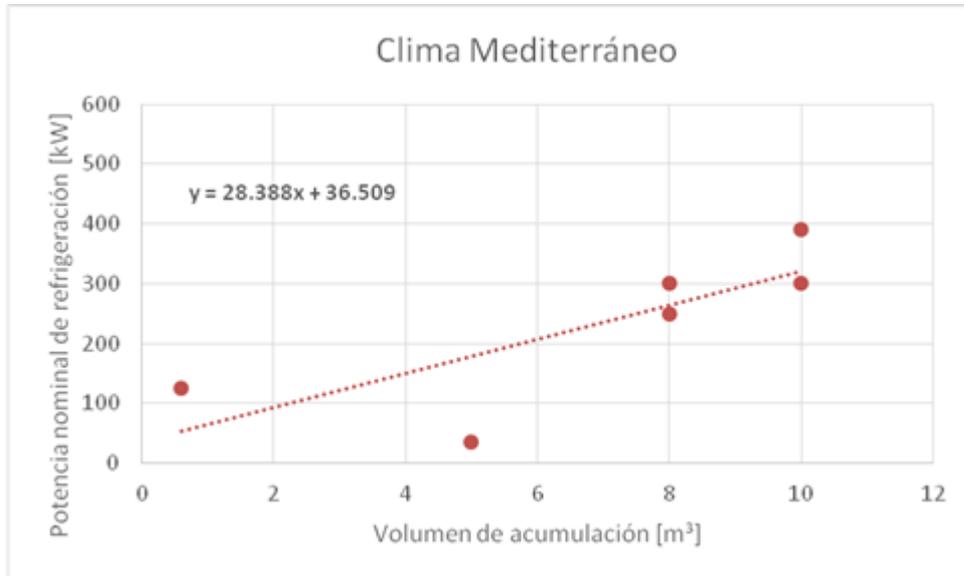


Gráfico 22: Ratio m^3/kW con tubo de vacío en clima Mediterráneo

Los puntos son más escasos debido a que el dato del volumen de acumulación, necesario para este ratio, no se encuentra con facilidad en todas las instalaciones.

▪ *Clima Oceánico*

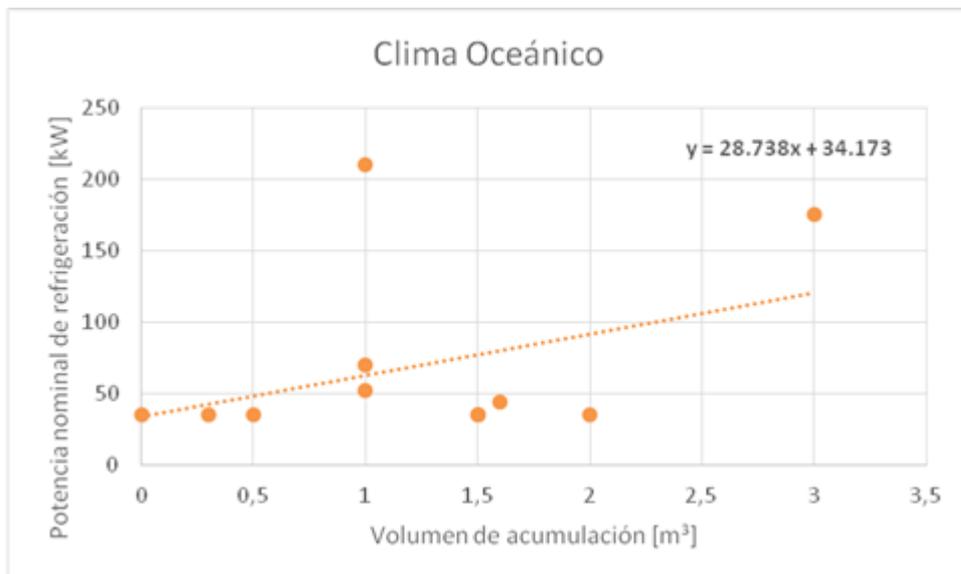


Gráfico 23: Ratio m^3/kW con tubo de vacío en clima Oceánico

De nuevo ocurre algo similar, en el clima oceánico la potencia máxima que se puede alcanzar es inferior a la que se alcanzaría en un clima mediterráneo. El volumen de acumulación es tanto mayor, cuanto mayor sea la potencia nominal de refrigeración.

✚ *RATIO COMPARATIVO DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN Y EL VOLUMEN DE ACUMULACIÓN*
(m^2/m^3)

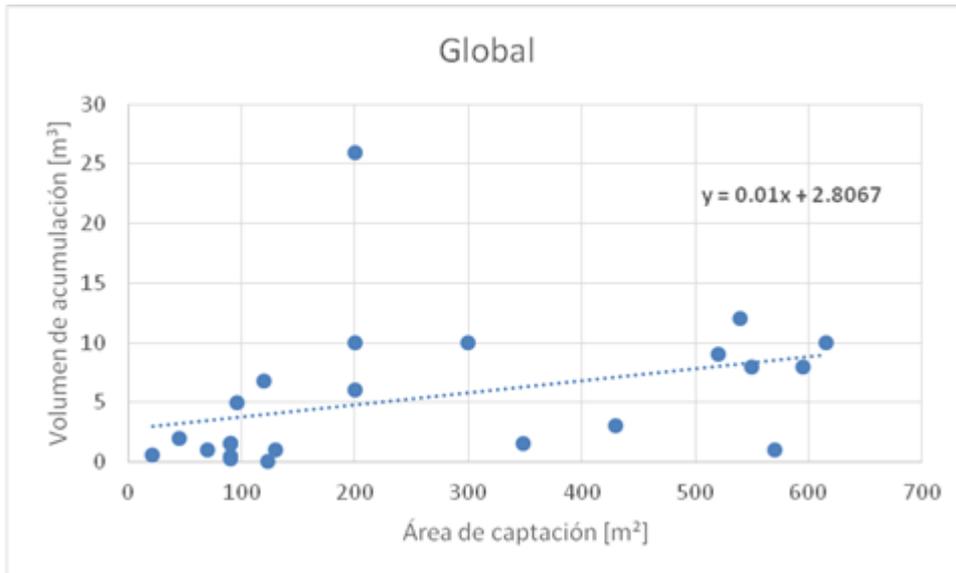


Gráfico 24: Ratio m^2/m^3 global con tubo de vacío

▪ *Clima Mediterráneo*

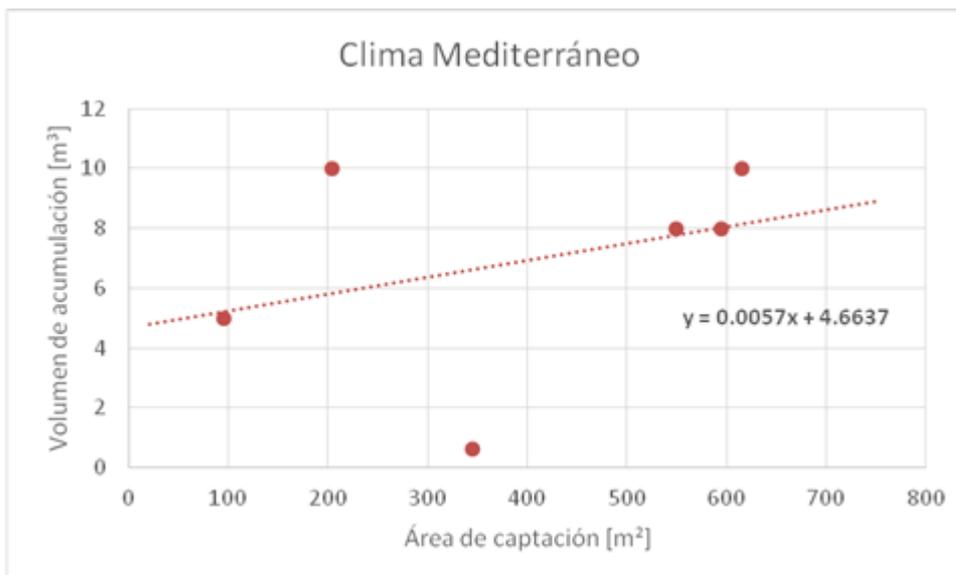


Gráfico 25: Ratio m^2/m^3 con tubo de vacío en clima Mediterráneo

▪ *Clima Oceánico*

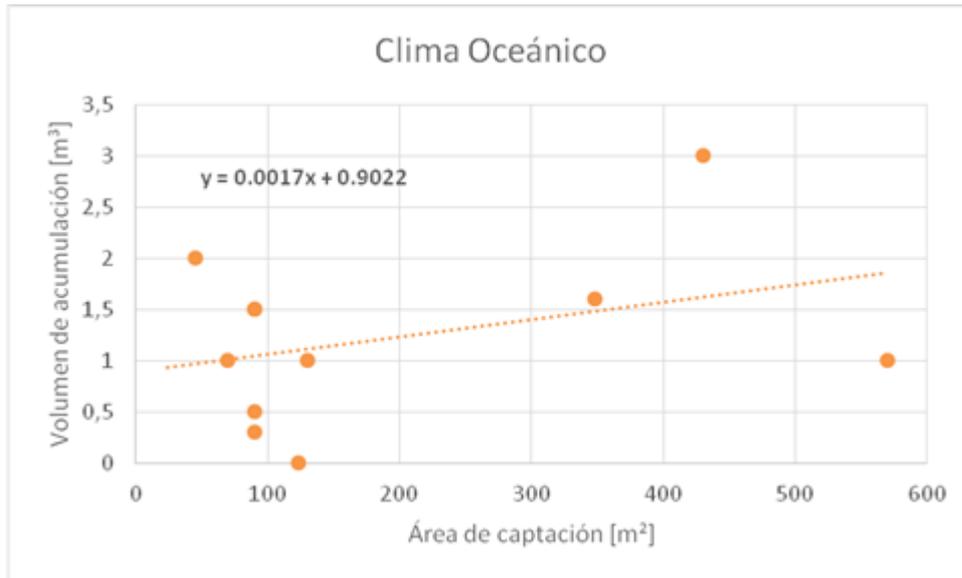


Gráfico 26: Ratio m^2/m^3 con tubo de vacío en clima Oceánico

En el clima Mediterráneo el área de captación y el volumen del acumulador es mayor que en los climas más fríos.

❖ **CONCLUSIÓN**

Atendiendo a las gráficas obtenidas se obtiene la siguiente relación:

PLACA PLANA	Clima Mediterráneo	Clima Oceánico
m^2/kW	4.1672	3.8833
m^3/kW	0.1	0.2657
m^2/m^3	42	3.8823

Tabla 14: Correlaciones en absorción con placa plana

TUBO DE VACÍO	Clima Mediterráneo	Clima Oceánico
m^2/kW	1.649	2.6699
m^3/kW	0.0392	0.01876
m^2/m^3	42.07	142.32

Tabla 15: Correlaciones en absorción con tubo de vacío

Se puede observar numéricamente como en las instalaciones localizadas en el clima mediterráneo se obtienen mayores resultados que en las que se encuentran instaladas en el clima oceánico. Esto es debido a la mayor irradiancia diaria que se da en estos climas, los cuales poseen unas condiciones climatológicas más idóneas para las instalaciones que los climas oceánicos.

Se observa en las *Tablas 14 y 15* una diferencia muy grande entre el número que relaciona la superficie de captación con el volumen del acumulador para tubo de vacío y placa plana. Esto se debe a que las instalaciones agrupadas en el *Anexo 1* que utilizan captadores de tubo de vacío tienen una superficie de captación similar a las que usan placa plana, pero un volumen menor, o incluso no se tienen los datos de este último. Por ello, no se considera una buena referencia.

4.1.2. En función del tipo de uso

Independientemente del país, la distribución del uso que se le da a las instalaciones de absorción es el siguiente:

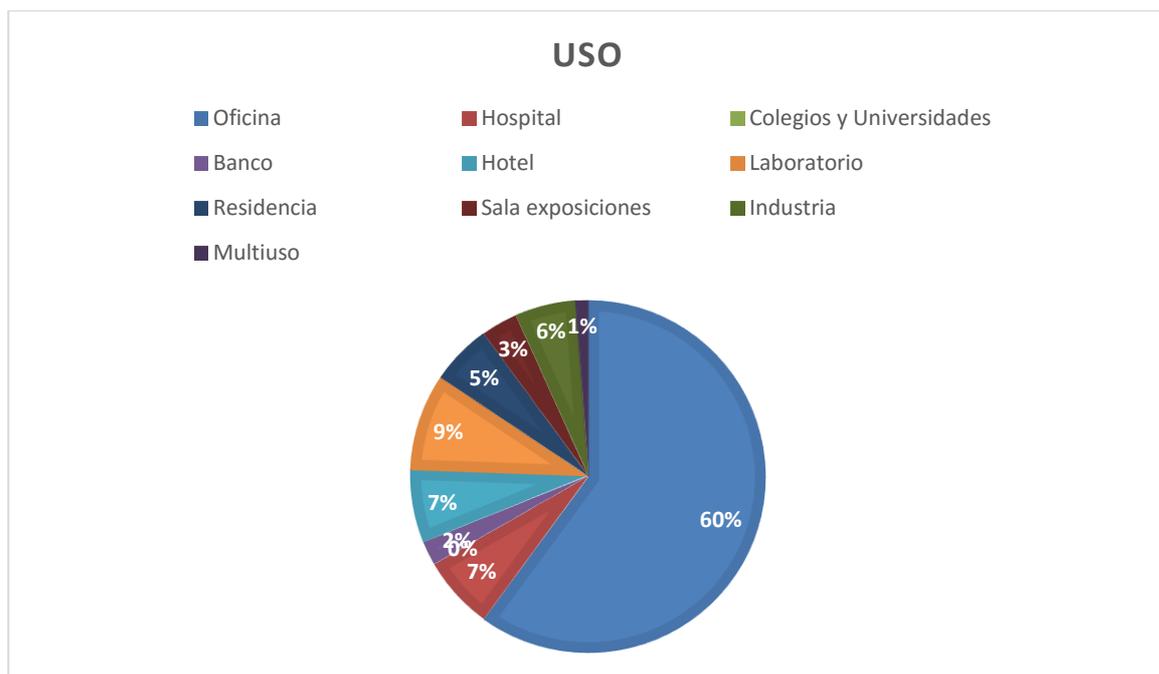


Gráfico 27: Distribución de las instalaciones de absorción según su uso

Tal y como se ve en el *Gráfico 27* este tipo de instalaciones es normalmente usado para la climatización de oficinas, aunque también es destacable su uso en laboratorios, hospitales y hoteles.

4.2. ADSORCIÓN

Este tipo de instalaciones es menos usado que el de absorción, por ello el objetivo en este caso será comparar de forma más generales las instalaciones recogidas en el *Anexo 1.2*.

4.2.1. En función del tipo de captador

I. PLACA PLANA

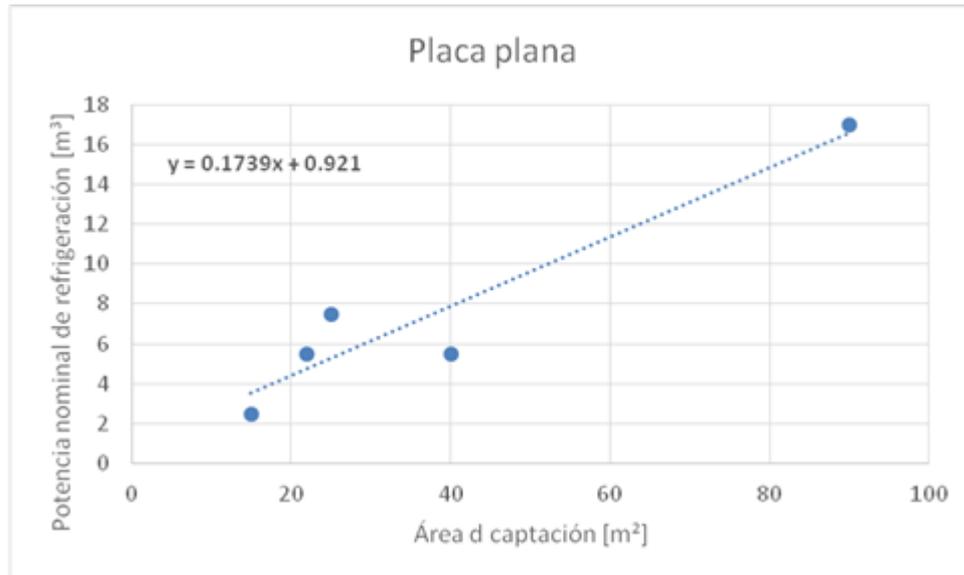


Gráfico 28: Ratio m^2/kW con placa plana

II. TUBO DE VACÍO

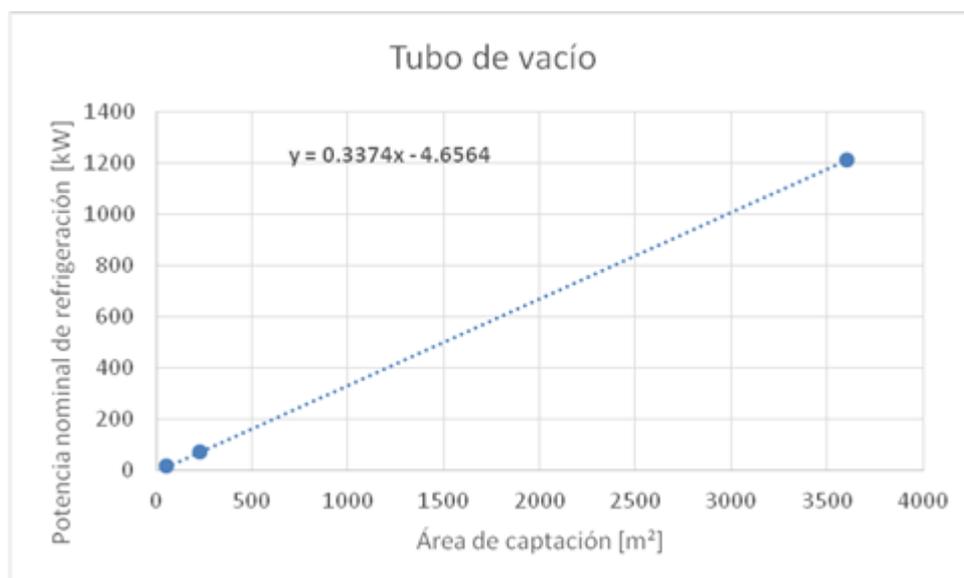


Gráfico 29: Ratio m^2/kW con tubo de vacío

Se han encontrado muy pocas instalaciones de este tipo, por lo que la línea de tendencia queda definida por los tres puntos que representan las instalaciones.

Este se ha considerado el ratio más significativo ya que apenas podemos encontrar los valores del volumen de acumulación, y no es posible la comparación de los demás ratios propuestos.

❖ CONCLUSION

Agrupando ambos resultados para una mayor comparación se tiene:

	Placa plana	Tubo de vacío
m^2/kW	3.67	3

Tabla 16: Correlaciones en adsorción

Tal y como se aprecia en los valores obtenidos, una instalación que utilice captadores de placa plana tendrá un mayor valor del ratio de superficie de captación entre potencia nominal de refrigeración.

4.1. RUEDA DESECANTE

En el *Anexo 1.3* se pueden ver todas las instalaciones encontradas de rueda desecante. En la lista se han encontrado 5 instalaciones repartidas por Alemania, Austria, China y España. Estas instalaciones son instalaciones comparativamente pequeñas, de las cuales la información más relevante sería el ratio con el que se obtiene que, aproximadamente, harán falta $2.614 m^2$ de superficie de captación por cada kW.

5. FABRICANTES

5.1. ABSORCIÓN

El mercado de las máquinas de absorción es bastante amplio, existiendo numerosos fabricantes de distintos países, con una amplia gama de productos. Los principales fabricantes según IDAE son *Climatewell*, *Sonnenklima*, *Schucö*, *Yazaki*, *Broad*, *EAW*, *Carrier*, *Trane*, *York*, *LG Machinery*, *SanyoMcQuay*, *Entropie*, *Thermax*... además de *Rotártica* y *Robur*.

Carrier y *York* son empresas con sede en Estados Unidos (EE.UU), aunque funcionan y operan en casi todo el mundo. Los productos de estas dos compañías se caracterizan por ser de media y alta potencia, comercializando máquinas de más de 250 kW de refrigeración.

Rotártica y *ClimateWell* son dos empresas europeas, con origen en España y Suecia respectivamente. A diferencia de los anteriores, se dedican a fabricar máquinas de baja potencia, ideales para viviendas familiares o pequeñas aplicaciones. La menor potencia que ofrecen ronda los 30 kW.

Cabe destacar que la empresa *Rotártica* entró en estado de quiebra y dejó de existir en el año 2010, aun habiendo fabricado un gran número de pequeñas máquinas de absorción.

EAW es un fabricante alemán que centra su fabricación en máquinas de baja y media potencia, llegando a ofrecer hasta 200 kW de potencia.

Broad, *Yazaki* y *Thermax* son fabricantes de origen asiático, más concretamente de China, Japón e India respectivamente. La gama de potencias ofertadas por *Broad* es una de más amplias, mientras que *Yazaki* y *Thermax* centran sus gamas de productos en la pequeña y media potencia.

En la siguiente figura ofrecida de nuevo por IDAE, pueden verse los rangos de potencias de cada uno de los fabricantes mencionados, además de otros no mencionados como son *Ago*, *Robur* y *Pink*, debido a que su producción se basa en aplicaciones de congelación, con temperaturas menores de 0°C, utilizando la pareja Amoniaco/Agua.

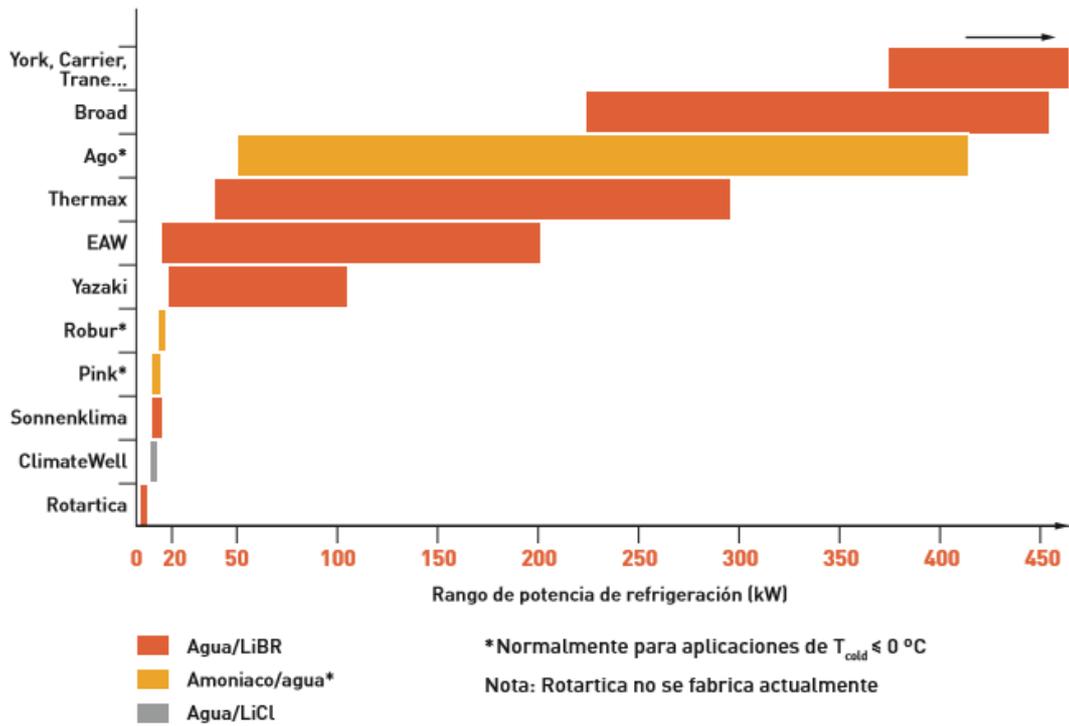


Figura 34: Orden de magnitud de la capacidad de enfriadoras de absorción (Lista no exhaustiva)[10]

Las máquinas de absorción pueden clasificarse en función del fluido que hace efectiva la condensación, así sea agua o aire. Las máquinas condensadas por aire, que no necesitan torre de refrigeración, apenas se encuentran en el mercado, y siguen en proceso de investigación y experimentación con prototipos en la mayoría de los casos. Las empresas que se atrevieron a sacarlas al mercado fueron Yazaki, Rotártica y Robur, con una producción de baja potencia.

Se muestra a continuación una tabla que resume las principales características de los diferentes equipos de absorción de cada firma.

Firma	Serie	Rango de potencias (kW)	COP nominal	Fluido de refrigeración	Uso de Energía Solar	Pareja de trabajo
Broad	BDS	233-6 978	0.79	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	BS	233-11 630	1.41	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	BDH	209-6 978	0.76	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	BH	233-11 630	1.41	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	BDE	233-11 630	0.79	Agua	NO	LiBr-H ₂ O
	BE	233-11 630	1.41	Agua	NO	LiBr-H ₂ O
	BZ	233-11 630	1.36	Agua	NO	LiBr-H ₂ O
	BZS,BZH,BZE,BZHE	233-11 630	1.36	Agua	SI/NO	LiBr-H ₂ O
Carrier	16DJ	352-5 274	1.1	Agua	NO	LiBr-H ₂ O
	16LJ	264-1 846	0.7	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	16TJ	352-2 461	0.65	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
ClimateWell	ClimateWell™ 10	20	0.68	Aire/agua	SI	LiCl-H ₂ O
Thermax	Cogenie LT	35-700	0.67	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	2V	175-5 450	1.43	Agua	NO	LiBr-H ₂ O
	SS	350-7 650	0.7	Agua	NO	LiBr-H ₂ O
	5G	800-4 000	0.7	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	2G (SH)	175-8 800	1.4	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	2B	175-8 800	1.4	Agua	NO	LiBr-H ₂ O
Trane	ABSC	394-1 635	0.63	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	ABSD	2 008-4 821	0.7	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	ABTF	1 266-6 053	1.2	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	ABDL	338-3 717	1	Agua	NO	LiBr-H ₂ O
Robur	ACF-60-00	17.5	0.74	Aire	NO	H ₂ O-NH ₃
	RTCF.	35-875	0.74	Aire	NO	H ₂ O-NH ₃
	AYF-119/2/4	17.5	0.74	Aire	NO	H ₂ O-NH ₃
	RTYF	35-70	0.74	Aire	NO	H ₂ O-NH ₃
Rotartica	Solar 045	4.5	0.67	Aire	SI	LiBr-H ₂ O
Yazaki	K	105-352	1	Agua	NO	LiBr-H ₂ O
	S	17.6-176	0.7	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
York	YIA	420-4 842	0.69	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	YPC-ST	1 050-2 373	1.19	Agua	SI	LiBr-H ₂ O
	YPC-DF	703-2 372	1	Agua	NO	LiBr-H ₂ O

Tabla 17: Principales características de los equipos de absorción analizados

La columna de “rango de potencias” y “COP nominal” corresponden al funcionamiento en modo de refrigeración.

La columna “Uso de Energía Solar” indica si la serie correspondiente puede acudir a la energía solar para el accionamiento de la máquina.

Una vez agrupados los modelos, se procede a entrar un poco más en detalle con cada uno de ellos según sea el fabricante, prestando atención a aquellos equipos que recurren a la energía solar, ya que es en lo que se centra el proyecto.

5.1.1. BROAD

Broad es una compañía de origen chino, fundada en 1988 por Zhang Yue. Esta empresa centra su atención en equipos de aire acondicionado centralizados, y exporta sus productos a más de 60 países en todo el mundo. Además, es conocida por ser una de las pocas empresas de fabricación china que ha sido reconocida por sus políticas verdes y su compromiso con el medio ambiente. En los últimos años ha mostrado un fuerte interés en la construcción de edificios sostenibles a través de su filial *Broad Sustainable Building*.

Uno de sus productos estrella, y que viene fabricando desde hace años, son los equipos de refrigeración por absorción. Todos ellos trabajan con la mezcla Bromuro de Litio-Agua, y son condensados por agua, por lo que la torre de refrigeración se hace indispensable. En España, es la compañía *Frigicoll* la que trabaja con los equipos de Broad.

La nomenclatura que sigue se rige por:

B: Broad

Z: Llama directa o fuego directo (FD)

E: Gases de escape (GE)

H: Agua caliente (AC)

D: Simple efecto

Serie BH y BDH

Estas máquinas son enfriadoras de absorción accionadas por agua caliente, siendo la serie BH de doble efecto y la serie BDH de simple efecto. Las máquinas de la serie BDH demandan agua caliente a una temperatura nominal de 85°C, mientras que las de la serie BH requieren agua sobrecalentada a una temperatura nominal de 170°C. Ambas aplicaciones pueden ser utilizadas en aplicaciones de refrigeración solar.

El rango de potencia de ambas series no es el mismo ya que, para la serie BH, puede variar de 233 hasta 11 630 kW, y en la serie BDH las potencias varían de 209 a 6 978 kW. Al no tener el mismo número de efectos, tampoco tienen el mismo COP, teniendo la serie BH un COP de 1.41 y la serie BDH de 0.76.

La serie BH cuenta con 14 modelos estándar, cuyos datos característicos se reúnen en el *Anexo 2.1*. Por otro lado, de la serie BDH se encuentran 12 modelos estándar.

Serie BS y BDS

Las máquinas de la serie BS y BDS ofrecidas por Broad, son enfriadoras alimentadas por vapor de agua, siendo la serie BDS de simple efecto y las de la serie BS de doble efecto. Estas series están recomendadas para plantas de trigeneración donde se utilice vapor, o bien en procesos donde exista una fuente de vapor residual. Sin embargo, al funcionar con vapor de agua, son aptas para la refrigeración solar, siempre y cuando el sistema de captación consiga las condiciones requeridas para el vapor.

La serie BS abarca un rango de potencias que va desde 233 hasta 11 630 kW, y las máquinas poseen un COP nominal de 1.41. Por otro lado, las máquinas de la serie BDS, de simple efecto, tienen un rango de potencias de refrigeración de 233 a 6 978 kW y un COP de 0.79.



Figura 35: Máquina de absorción de la serie BDH de Broad [30]



Figura 36: Máquina de absorción de la serie BS de Broad. [30]

En este caso, de la serie BS se muestran 14 modelos, y de la serie BDS, 12 modelos estándar recogidos en *Anexo 2.1*.

5.1.2. Carrier

Carrier es una empresa líder mundial en el sector de la climatización, fundada en 1902 por Willis Haviland Carrier. Y que actualmente forma parte del grupo *United Technologies Corporation (UTC)*, que engloba empresas líderes en diversos sectores de la industria.

Comercializa todo tipo de equipos de climatización, desde equipos para el sector residencial, como para distintos sectores de la industria. En cuanto a su gama de enfriadores de absorción, trabaja con Bromuro de Litio-Agua y son condensados por agua, además, todos ellos son producidos por *Sanyo*.

Carrier ofrece tres clases distintas de enfriadoras de absorción, con diferentes tamaños, de las cuales son dos las que permiten el accionamiento con energía solar.

Serie 16LJ

Esta serie la forman las enfriadoras de absorción de simple efecto accionadas por agua caliente. Las máquinas de esta serie son ideales para ser utilizadas en aplicaciones de refrigeración solar.

Existe una gama de 15 tamaños dentro de esta serie, cuyo rango de potencias va desde 264 hasta 1 846 kW. El COP de estos equipos de simple efecto es de 0.7.



Figura 37: Máquina de absorción de la serie 16LJ de Carrier [31]

En el *Anexo 2.1*, se muestra la tabla de datos técnicos de la serie 16LJ extraída del catálogo.

Serie 16TJ

La serie 16TJ son enfriadoras de absorción que utilizan un ciclo de simple efecto y son accionadas por vapor de agua. Por lo tanto, estas máquinas pueden ser usadas en aplicaciones de refrigeración solar, siempre y cuando se obtenga vapor de agua de los captadores solares.

La serie está compuesta por máquinas de 15 tamaños diferentes, cuyo rango de potencia frigorífica va desde 352 hasta 2 461 kW, con un COP de 0.7.



Figura 38: Máquina de absorción de la serie 16TJ de Carrier [31]

Se muestra en el *Anexo 2.1.* la tabla de datos técnicos de la serie 16 TJ, extraída del propio catálogo.

5.1.3. ClimateWell

ClimateWell es una compañía de origen sueco, fundada en 2001 por Mr. Goran Bolin y Mr. Ray Olsson. Esta compañía fue fruto de la unión de dos empresas, *Solam Sunergy* y *SunCool*. Desde su fundación, *ClimateWell* tenía la idea de crear un sistema de climatización económicamente sostenible y que respetase el medio ambiente.

Fue en el 2008, al finalizar la construcción de la planta de producción en Olvega (España), cuando *ClimateWell* comenzó con la venta global de sus productos de refrigeración sostenible. A partir de ese momento la compañía ha seguido creciendo y ha sido galardonada en numerosas ocasiones.

Las máquinas de absorción comercializadas por esta empresa difieren bastante de las máquinas de absorción estándar. A continuación se muestran las principales características de estas máquinas denominadas *ClimateWell 10*.

ClimateWell 10

Esta es una máquina de absorción modular, que difiere de las máquinas de absorción más típicas (de bromuro de litio-agua) en tres aspectos básicos.

En primer lugar, la enfriadora no trabaja con Bromuro de Litio-Agua, sino con Cloruro de Litio-Agua. Cuenta con un depósito de almacenamiento interno en cada uno de los dos acumuladores. De esta forma la máquina puede almacenar energía química con una gran densidad gracias a las propias sales de cloruro de litio. En consecuencia, esta energía puede ser utilizada tanto para refrigerar como para calentar. Cabe señalar que lo que se almacena no es energía térmica sino química.

Funciona de manera intermitente con dos acumuladores en paralelo y ha sido diseñado para trabajar con temperaturas relativamente bajas, por lo que permite y es óptimo su empleo con colectores térmicos solares.



Figura 39: Máquina de absorción ClimateWell 10 [32]

ClimateWell 10 puede operar en tres modos diferentes: carga, calefacción y refrigeración. El modo de carga almacena energía secando la sal Cloruro de Litio, para utilizarla cuando sea necesario. Gracias que esta tecnología posee dos sistemas conectados en paralelo, mientras uno se carga y almacena energía el otro puede producir frío.

Este tipo de máquina tiene una potencia frigorífica de 10 kW y un rendimiento de operación (COP) en modo refrigeración es de 0.68 en el funcionamiento normal, es decir, un sistema de Cloruro de Litio-Agua cargándose y el otro aportando refrigeración. Sin embargo, si los dos sistemas trabajan en modo de refrigeración simultáneamente la potencia puede llegar hasta los 20 kW.

Se muestra a continuación un resumen de estos datos.

Modo	Capacidad de almacenamiento	Potencia máxima de capacidad
Frío	60 kWh	10/20 kW
Calor	76 kWh	25 kW

Tabla 18: Características de ClimateWell 10 [32]

La capacidad de almacenamiento se refiere a la capacidad de almacenamiento máxima, cuando ambos barriles funcionan en modo de carga, de almacenamiento.

Por otro lado, la potencia máxima de capacidad es la capacidad de refrigeración por barril.

5.1.4. Thermax

Thermax es una empresa de ingeniería y medio ambiente de origen indio y con sede en la India y Gran Bretaña. Fue fundada en 1980 y actualmente ofrece sus productos en más de 70 países del mundo. La compañía se dedica a la fabricación de calderas, máquinas de climatización convencionales y enfriadoras de absorción. *Thermax* también se encarga del diseño de instalaciones energéticas y ofrece soluciones para tratamiento de aguas y residuos.

Todos los equipos fabricados por esta empresa trabajan con el par Bromuro de Litio-Agua y son condensados por agua, por lo que será necesario el uso de la torre de refrigeración.

Produce una gran diversidad de enfriadoras de agua por absorción, pero solo aquellas que funcionan con agua caliente son las que están diseñadas para ser instaladas junto a un sistema de captación solar como fuente de energía externa. Se conocen como las series LT, 5G y 2G.

Serie Cogenie LT

Las máquinas de esta serie son enfriadoras de absorción de simple efecto accionadas mediante agua caliente a una temperatura que puede oscilar entre 75 y 120°C. Esta serie de enfriadoras son ideales para trabajar en aplicaciones de refrigeración solar, ya que la temperatura del agua necesaria para funcionar se puede conseguir con la mayoría de los sistemas de captación.

El rango de potencias de refrigeración va desde 35 kW hasta 700 kW, y su COP nominal está ente 0.65 y 0.72.



Figura 40: Máquina de absorción de la serie LT de Thermax [33]

Serie 5G

Esta es una serie totalmente análoga a la serie LT, son enfriadoras de absorción de simple efecto accionadas por agua caliente. La diferencia entre ambas reside en la potencia de refrigeración. En el caso de la serie LT eran máquinas menores de 700 kW, y en la serie 5G 700 kW es el límite inferior, a partir del cual empieza. Este tipo de enfriadoras puede utilizarse utilizando captadores solares que proporcionen agua a una temperatura de 70 a 95°C.

El rango de potencias de refrigeración va desde 800 kW hasta 4 000 kW. El COP nominal está entre 0.7 y 0.75.



Figura 41: Máquina de absorción de la serie 5G de Thermax [33]

Serie HS

Esta serie engloba a enfriadoras de absorción de doble efecto accionadas también por agua caliente, que debe oscilar entre 150°C y 180°C. Esta serie puede funcionar en aplicaciones de refrigeración solar aunque la temperatura requerida para su accionamiento sea bastante elevada. Habría que optar por concentradores que alcanzasen altas temperaturas, como los CPC.

El rango de potencias de refrigeración de esta serie va desde 200 kW hasta 12 000 kW. El COP nominal está entre 1.4 y 1.45, muy superior al de las máquinas de simple efecto de las series LT y 5G. Se encuentran hasta 28 modelos en esta serie.



Figura 42: Máquina de absorción de la serie HS de Thermax [33]

5.1.5. Yazaki

Yazaki Corporation es una empresa japonesa fundada en 1929. Se trata de uno de los mayores proveedores de automoción de todo el mundo, y fue reconocida ente las 20 mayores compañía de automoción por la revista *Automovie News* en 2010.

Sin embargo, *Yazaki* no solo se centra en el campo de la automoción, y su línea de productos abarca tal variedad como cables eléctricos, instrumentos de medición, equipos de gas, aire acondicionado y sistemas de energía solar. Aún tiene su sede en Japón, pero cerca del 90% de sus trabajadores se encuentran fuera de este país.

Es a partir de los años 80 cuando la compañía empieza a trabajar con equipos de absorción. En España es la empresa *Absorsistem S.L.* la que se encarga de la distribución de los equipos de *Yazaki*. Todos los sistemas de esta firma que se encuentran en el mercado funcionan con la solución Bromuro de Litio-Agua y son condensados por agua.

Yazaki comercializa dos gamas distintas de absorción, pero será la serie WFC S la que atiende a la energía solar. Las enfriadoras de esta serie son de absorción de simple efecto accionadas por agua caliente.

Serie WFC S

Como ya se ha mencionado, la serie S agrupa a las máquinas de absorción de simple efecto que funcionan gracias a una corriente de agua caliente. La temperatura de alimentación de esta corriente de agua debe oscilar entre 70 y 95°C.

Dentro de esta seriase encuentran 5 tamaños distintos y abarcan un rango de potencia desde 17.6 kW hasta 176 kW. El COP nominal de esta gama de enfriadoras es de 0.7 y todas son condensadas por agua, por lo que será imprescindible la torre de refrigeración.



Figura 43: Máquina de absorción de la serie WFC S de Yazaki [34]

Se distinguen dentro de esta serie de enfriadoras dos “sub-series” cuya diferencia es que una de ellas solo puede trabajar en modo refrigeración (serie WFC SC), mientras que la otra también puede funcionar como bomba de calor (serie WFC SH).

Tipo de enfriadora	Capacidad de refrigeración [kW]
WFC-SC5/SH5	17.5
WFC-SC10/SH10	35
WFC-SC20/SH20	70
WFC-SC30/SH30	105
WFC-SC50/SH50	175

Tabla 19: Capacidad de la gama WFC-SC y WFC-SH de Yazaki (Fuente: Absorsistem)

5.1.6. York

York fue una compañía dedicada a la climatización en los sectores residencial, terciario e industrial. Fue absorbida por la multinacional americana *Johnson Controls* en el año 2005, aunque mantiene su nombre como *York by Johnson Controls*. Esta compañía ofrece una gran variedad de productos que abarcan la automoción, la eficiencia energética en edificios, baterías, etc.

Todas las enfriadoras que se fabrican utilizan el par de trabajo Bromuro de Litio-Agua y condensan por agua, de nuevo será necesaria la torre de refrigeración.

York comercializa dos series distintas de enfriadoras de absorción: la serie YPC, que engloba enfriadoras de absorción de doble efecto; y la serie YIA, enfriadoras de absorción de simple efecto que se accionan por una corriente de agua caliente o vapor.

Serie YPC

Los equipos de esta serie se caracterizan por ser enfriadoras de doble efecto. Existen dos “sub-series” en función del tipo de accionamiento. Será de interés la serie YPC-ST, que funciona mediante una corriente de vapor de agua y, por tanto, sería apta para el uso combinado con energía solar, siempre y cuando el sistema de captación solar pueda producir el vapor en las condiciones requeridas.

La gama de potencias va desde 1 050 hasta 2 373 kW y el rendimiento o COP medido en condiciones nominales es de 1.19.



Figura 44: Máquina de absorción de la serie YPC-ST de York [35]

Serie YIA

La serie YIA está compuesta por máquinas de absorción de simple efecto y pueden ser accionadas por llama directa, agua caliente o vapor, por lo que son aptas para usarlas en aplicaciones de frío solar.

Estos equipos abarcan una amplia gama de potencias, mayores a las de la otra serie disponible en York. Estas potencias van desde 420 hasta 4 842 kW, existiendo 21 tamaños o modelos diferentes, con COP de, aproximadamente, 0.7.



Figura 45: Máquina de absorción de la serie YIA de York [35]

5.2. ADSORCIÓN

A diferencia de la absorción, el mercado de las máquinas de adsorción no es tan amplio. Existen principalmente 4 fabricantes de este tipo de máquinas, que tienen su origen en Japón o Alemania. Estas compañías son *Mycom-Mayekawa*, *Nishido*, *Invensor* y *SorTech*.

Mycom-Mayekawa es una empresa japonesa que tiene una amplia gama de productos como compresores, bombas de calor, cortinas de aire y equipos de climatización. Entre los equipos de climatización se encuentran enfriadoras de adsorción que van desde 105 hasta 400 kW. *Nishido* es otra compañía japonesa que también produce máquinas de adsorción con una gama de potencias similar.

Las dos compañías restantes, *Invensor* y *SorTech*, son fabricantes alemanes. A diferencia de las compañías japonesas mencionadas, la gama de potencias de estas compañías es más reducida y está destinada a la pequeña escala, con potencias menores a los 20 kW.

En el siguiente diagrama se muestran las gamas de potencias de los fabricantes más importantes de enfriadoras de adsorción. Hay que tener en cuenta, que aunque *SorTech* e *Invensor* cuenten con máquinas de reducida potencia, mediante la conexión de varias de ellas pueden alcanzarse potencias mayores.

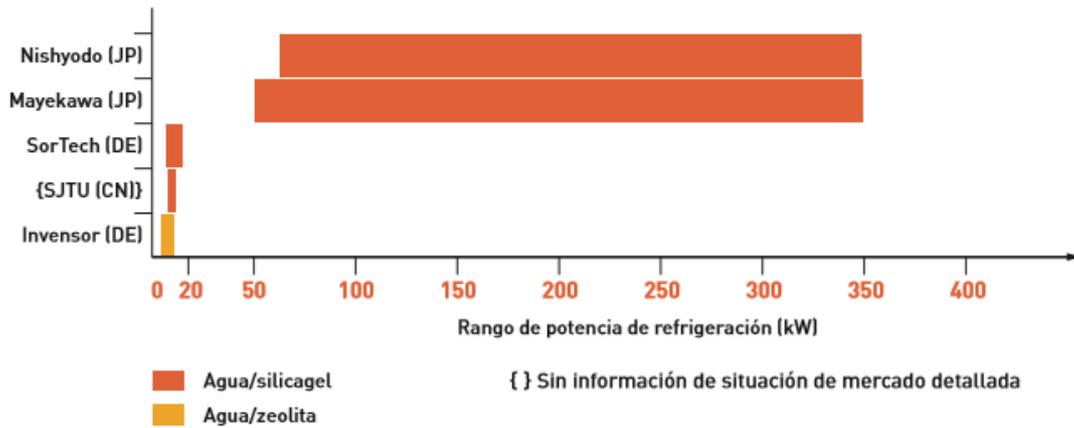


Figura 46: Capacidad de enfriadoras de adsorción [10]

Firma	Serie	Potencia (kW)	COP nominal	Uso de Energía Solar	Pareja de trabajo
Invensor	LTC	10	0.65	SI	Zeolita- H_2O
	HTC	18	0.55	SI	
Mayekawa	Z-3515	105	0.6	SI	Zeolita- H_2O
	Z-3525	215	0.6	SI	
	Z-6025	430	0.6	SI	
Nishido	ADCM1 60	185	0.7	SI	Gel de sílice-Agua
	ADCM1 90	264	0.7	SI	
	ADCM1 145	422	0.7	SI	
	ADCM1 180	528	0.7	SI	
SorTech	eCoo 2.0	16-240	0.65	SI	Gel de sílice-Agua
	eZea	13-200	0.53	SI	Zeolita

Tabla 20: Principales características de los equipos de adsorción analizados

Se procede a comentar detalladamente cada uno de los fabricantes de estas máquinas.

5.2.1. Invensor

Invensor es una compañía alemana fundada en el año 2006 en Berlín, y que actualmente tiene su sede en la misma ciudad. La compañía desarrolla y produce enfriadoras de adsorción de baja y alta temperatura exterior, para climatización de interiores accionadas por calor residual o por energía solar. Las enfriadoras que fabrican usan Zeolita y agua como pareja de trabajo.

Su mercado principal está en Europa, aunque vende numerosos equipos en Asia, África y América. *Invensor* comercializa dos series de máquinas de adsorción, la serie LTC y la serie HTC. La primera serie

está pensada para climas en los que la temperatura exterior no supere los 35°C, mientras que la segunda se diseña para temperaturas exteriores superiores a 35°C.

Serie LTC

La serie LTC, cuyas siglas vienen de *Low Temperature Chillers*, está formada por las enfriadoras LTC 10 plus y LTC 10 vario. Ambas enfriadoras son muy parecidas, dan 10 kW de potencia frigorífica nominal, su COP es de 0.65, funcionan con el mismo rango de temperaturas, etc. La diferencia está en el diseño interior, mientras que LTC 10 vario está diseñada para poder acoplar varias y conseguir potencias superiores, LTC 10 plus se diseña para trabajar con una sola.

En cuanto a las principales especificaciones de la enfriadora, iguales para ambas, la temperatura nominal de entrada del agua caliente es de 72°C, aunque con temperaturas cercanas a 65°C la enfriadora puede producir potencias cercanas a la nominal. Gracias a que se accionan con estas temperaturas tan bajas son ideales para conectarlas a un sistema de captación solar, ya que la gran mayoría de captadores solares pueden alcanzar las temperaturas demandadas.



Figura 47: Máquina de adsorción LTC 10 plus de Invenzor [36]

Serie HTC

La serie HTC o High Temperature Chillers se compone de las máquinas HTC 18 plus y HTC 18 vario, siendo la diferencia entre ambas la misma que entre las de la serie LTC comentada anteriormente.

La temperatura nominal de entrada de agua caliente es de 85°C, bastante superior a las de la serie anterior debido a que se ha diseñado para un funcionamiento con temperaturas exteriores muy elevadas. La

temperatura de entrada del agua caliente sigue siendo adecuada para el uso de captadores solares, y a esto hay que sumarle que las condiciones exteriores al ser las temperaturas más elevadas, son más favorables para la instalación de captadores solares.

Las máquinas de ambas series son físicamente iguales.

5.2.2. MYCOM-Mayekawa

Mayekawa Manufacturing Company es una empresa japonesa que fue fundada en 1924 por Kisaku Maekawa en Tokio. En su origen comercializaba equipos de refrigeración por compresión verticales, especiales para producción y almacenamiento de hielo. Actualmente se trata de una multinacional presente en decenas de países y especializada en la fabricación de equipos de climatización industrial, compresores alternativos y de tornillo y todo tipo de equipos relacionados con la actividad de producción.

Dentro de los equipos de climatización, *Mayekawa* produce varias series de equipos de refrigeración que utilizan el ciclo de adsorción, todos ellos utilizan como par de trabajo gel de zeolita y agua.

La serie que engloba las diferentes máquinas de adsorción de esta compañía son las llamadas AdRef-Noa, y está compuesta por tres máquinas distintas cuya principal diferencia es el tamaño, tanto en potencias frigoríficas como en dimensiones.

Serie Z-3515

Las enfriadoras por adsorción Z-3515 son las máquinas de menor potencia que fabrica *Mayekawa*. La potencia frigorífica es de 105 kW y el COP medido en condiciones nominales es de 0.6.

Son ideales para su combinación con sistemas de captación solar, ya que la temperatura a la que el agua de regeneración tiene que llegar a la máquina es de 65 a 80°C.

Serie Z-3525

Las enfriadoras por adsorción de mediana potencia tienen el nombre de Z-3525. La potencia frigorífica aumenta hasta 215 kW y por lo tanto también aumenta el peso de esta, pasando de 6 600 a 10 000 kg. El COP medido en condiciones normales se mantiene en 0.6 ya que el ciclo es el mismo.

La temperatura de regeneración requerida es la misma que las máquinas anteriores, entre 65 y 80°C, y por eso también son ideales para el uso en refrigeración solar. Cabe destacar que el caudal de agua necesario aumenta considerablemente con el paso de una máquina a otra.

Serie Z-6025

Estas son las enfriadoras de adsorción más grandes que produce *Mayekawa*, con una potencia de refrigeración de 430 kW. El peso aumenta hasta llegar a los 15 000 kg, manteniéndose el COP constante. La temperatura que debe alcanzar la corriente de agua sigue siendo la misma, y el caudal vuelve a aumentar.



Figura 48: Máquina de adsorción de la serie AdRef-Noa de Mayekawa [37]

5.2.3. Nishiyodo

Su nombre completo es *Nishiyodo Kuchou Manufacturing Company*. Es una compañía japonesa con más de 30 años de experiencia y fue la primera empresa en desarrollar y comerciar una máquina de refrigeración por adsorción.

En España es la empresa ICOGEN S.A. la que se encarga de la distribución de los equipos de esta firma. Todos los equipos fabricados por *Nishiyodo* trabajan con Gel de sílice y agua.

Esta compañía comercializa la serie ADCM1 de enfriadores de adsorción, de los que existen cuatro modelos distintos, cada uno con potencias nominales diferentes, pero todos trabajan con el mismo ciclo de adsorción, y por lo tanto poseen el mismo COP nominal, con un valor de 0.7.

Serie ADCM1	60	90	145	180
COP	0.7	0.7	0.7	0.7
Potencia (kW)	185	264	422	528

Tabla 21: Clasificación de la serie ADCM1 de Nishiyodo [38]

Todos los modelos de la serie ADCM1 están diseñados para una temperatura de entrada del agua caliente de 90°C, pero gracias a su gran flexibilidad de funcionamiento pueden funcionar con potencias y rendimientos muy cercanos a los nominales con temperaturas de entrada entre 80 y 70°C.

De hecho, las enfriadoras de adsorción de *Nishiyodo* pueden operar con una temperatura de entrada del agua caliente de tan solo 50°C, aunque penalice la potencia y el rendimiento.

En el catálogo del fabricante se encuentran las tablas para cada modelo donde puede apreciarse la potencia frigorífica o la producción de agua a 7°C que cada máquina puede alcanzar cuando la temperatura del agua caliente disminuye de su valor de diseño (80°C). El Anexo 2.2. muestra las variaciones señaladas en la tabla extraída del catálogo.



Figura 49: Máquina de adsorción de la serie ADCM1 de Nishiyodo [38]

5.2.4. SorTech

SorTech AG es una compañía alemana fundada en 2002 que tiene su sede en la ciudad de Halle. Es una empresa que se dedica desde su fundación al desarrollo y venta de equipos de refrigeración por adsorción. Pese a que no es una empresa grande ha vendido más de 500 equipos de refrigeración por adsorción y su mercado abarca a Europa, Norte y Sur América y parte de Asia y África. Los equipos de adsorción fabricados por *SorTech* pueden trabajar con Gel de sílice o con Zeolita, y están pensados para trabajar con aplicaciones de refrigeración solar.

SorTech fabrica dos series de enfriadoras por adsorción, la primera de ellas llamada eCoo 2.0 trabaja con Gel de sílice y agua, mientras que la segunda, llamada eZea, trabaja con Zeolita. Una de las características de las máquinas producidas por la empresa es su necesidad de acoplamiento si se quieren alcanzar grandes potencias, ya que son máquinas de reducida potencia.

Serie eCoo 2.0

Tal y como se ha mencionado, está compuesta por las máquinas de adsorción que trabajan con Gel de sílice. La potencia nominal de las máquinas de esta serie es de 16 kW y su COP puede alcanzar valores de 0.65.

Aunque la potencia del equipo es reducida, gracias al acoplamiento en cascada pueden alcanzarse potencias de hasta 240 kW con el mismo rendimiento. Además estos equipos están diseñados para que el acoplamiento se pueda realizar de forma rápida y segura.

Serie eZea

La serie eZea está compuesta por máquinas de adsorción de 13 kW que trabajan con Zeolita y agua. El COP de esta serie es 0.53 y es ligeramente inferior al de la serie eCoo 2.0 debido a que la Zeolita tiene menor capacidad de adsorción y, en términos generales, el ciclo por adsorción con Zeolita posee menor rendimiento.

Al igual que la serie eCoo 2.0, las máquinas de la serie eZea están diseñadas para que puedan ser acopladas de manera sencilla y eficaz, pudiendo alcanzar una potencia máxima de 200 kW.



Figura 50: Máquina de adsorción de SorTech [39]

Físicamente ambas máquinas son similares.

Atendiendo a los datos que se recogen en el Anexo 2.2., se observa que para los mismos caudales de entrada y salida, la serie eZea demanda una mayor temperatura del agua de regeneración y aun así produce menos potencia frigorífica que la serie eCoo 2.0. Por otro lado, el tamaño de la serie eCoo 2.0 es bastante superior que el de la serie eZea.

5.3. RUEDAS DESECANTES

Este tipo de sistemas no está comúnmente extendido, por ello no se encuentran demasiadas empresas encargadas de fabricar sistemas de refrigeración con rueda desecante.

Las principales compañías que destacan en la producción de estos sistemas se agrupan en la siguiente tabla:

Compañías	País de origen	Desecantes
Advantix	USA	SiGel
DRI	India	SiGel, silicatos
Klingenburg	Alemania	SiGel, LiCl, Óxidos de Al
Munsters USA	USA	SiGel, Óxidos de Al, Silicatos
Munsters AB	Suecia	SiGel, Óxidos de Al, Silicatos
Nichias	Japón	SiGel
NovelAire	USA	SiGel
PorFlute	Suecia	SiGel, Óxidos de Al, Silicatos
Rotor Source	USA	SiGel, tamices
Seibu Giken	Japón	SiGel, silicatos

Tabla 22: Compañías fabricantes de sistemas de refrigeración con rueda desecante

Se puede apreciar que el desecante más usado por las compañías es el gel de sílice (SiGel), seguido de otros desecantes como los óxidos de aluminio y los silicatos.

Las principales compañías en Europa tienen su origen en Suecia o en Alemania. Estos dos países tienen climas que se adaptan muy bien al funcionamiento de los sistemas de refrigeración evaporativos con desecantes, debido a que no sufren temperaturas extremas ni humedades muy altas. En el resto del mundo destacan las compañías de USA y Japón.

Resulta complicado encontrar fabricantes de este tipo de equipos, y la mayoría de sistemas que se instalan forman parte de programas para la incentivación de este tipo de tecnologías, en el cual los equipos forman parte de una composición de distintos fabricantes. Algunos de los fabricantes mencionados en la tabla anterior se dedican a la fabricación de los elementos por separado, como son la compañía *Munsters* o *Klingenburg*. Por ello no se entrará en demasiado detalle en estas compañías.

La empresa *Advantix* fue creada en 1971, y ofrece 3 líneas diferentes de productos que proporciona energía eficiente de deshumidificación y refrigeración. Las tres series son las denominadas DT, DH y DB, de las cuales sólo las dos últimas pueden funcionar con energía solar. Esta tecnología es capaz de proporcionar tanto baja como alta potencia.

	Serie DH		Serie DB
	Small	Large	Large
Potencia (kW)	9.55-21.1	43-80	70

Tabla 23: Rango de potencias de las máquinas de ruedas desecantes de Advantix [40]

Dentro de la serie DH se distinguen dos grupos dependiendo del tamaño que presenten. Dentro de estos grupos se encuentran otros 3 tipos, lo que hace un total de 6 tipos diferentes de máquinas de la serie DH. Por otro lado, de la serie DB sólo se encuentra una sola máquina.



Figura 51: Sistema de refrigeración con rueda desecante de la serie DH de Advantix [40]

6. CONCLUSIONES

Tras haber hecho una recopilación de una serie de instalaciones localizadas por todo el mundo de los diferentes tipos de tecnologías de refrigeración solar, se ha hecho un análisis estadístico del que podemos sacar algunas conclusiones. Este análisis estadístico ha consistido en un primer análisis global, donde se analiza mundialmente la tendencia de las instalaciones solares de baja temperatura, y un posterior estudio más detallado y concreto.

En primer lugar, se destaca la gran diferencia que existe entre el número de instalaciones existentes de absorción con las que se encuentran de adsorción o rueda desecante, siendo las primeras de las que más se encuentran. Esto se debe, entre otras cosas, a que la tecnología de absorción viene desarrollándose desde hace varios años más que las otras dos restantes.

Uno de los factores importantes es el clima que se da en la localización del sistema de refrigeración. Se distinguen dos tipos de clima principales en Europa, que son el Clima Mediterráneo y el Clima Oceánico, dado en los países aproximadamente del Sur y Centro respectivamente.

Comenzando por los sistemas de absorción, en los países donde el clima es Mediterráneo se obtiene una mayor potencia nominal de refrigeración que en el Clima Oceánico para un área de captación similar. Esto es debido a que las condiciones ambientales son idóneas en los primeros, ya que la nubosidad es baja, la humedad también es baja y la gran radiación solar directa que recibe diariamente.

Otro aspecto destacable es el tipo de captador solar utilizado, ya sea captador de placa plana o tubo de vacío. Atendiendo a los ratios obtenidos, el uso de tubos de vacío ofrece, aparentemente, una mayor potencia frigorífica nominal que la que se daría para una misma superficie de captación con captadores solares planos. Esta diferencia es bastante significativa ya que, según los números, con el uso de placa plana haría falta un poco más del doble de superficie de captación de lo que necesitarían los captadores de vacío en un Clima Mediterráneo. Sin embargo, en un Clima Oceánico esta diferencia es más pequeña, difiriendo en poco más de un punto.

En cuanto a la comparación de la superficie o la potencia con el volumen de acumulación, no se puede considerar como una referencia fiable, ya que no en todas las instalaciones se consigue conocer el valor de dicho volumen. En general, no se da más de medio m³ por cada kW de potencia nominal, independientemente del clima donde se encuentre.

Si fijamos la atención en los distintos usos de estos sistemas de refrigeración por absorción, se observa que más del 60% se destina a la climatización de oficinas. El porcentaje restante abastece a hospitales, residencias de ancianos, laboratorios y hoteles, entre otros.

Si pasamos ahora a los ciclos de adsorción, se observa una tendencia casi similar a la anterior. En este caso nos hemos basado en un número menor de instalaciones, y se han obtenido unos valores aproximados entre el uso de placa plana y tubo de vacío, siendo la última opción mejor, al igual que en el ciclo de absorción.

Sobre los sistemas de rueda desecante no se ha obtenido mucha información debido a las escasas instalaciones encontradas. Se puede decir, basándonos en lo estudiado, que se requiere un poco menos de superficie de captación con esta tecnología que con las anteriores, por cada kW de potencia nominal de refrigeración

Acerca de los fabricantes se podría destacar que las empresas que fabrican estos sistemas de refrigeración tienen su origen principalmente en los países de Japón, Alemania o Estados Unidos, aunque su distribución es mundial. A la par que las instalaciones, hay numerosas empresas que se dedican a la fabricación de sistemas de absorción o incluso adsorción, pero muy pocas lo hacen con ruedas desecantes.

Finalmente, se puede decir que la climatización mediante energía solar está en auge, y debería estarlo aún más en aquellos países donde las condiciones climáticas sean favorables para el buen funcionamiento del sistema, ya que se consigue un mayor aprovechamiento de la radiación solar, tal y como nos han mostrado los ratios. Si estas condiciones se acompañan de un sistema que utilice tubos de vacío, se conseguirá un ahorro en el área de captación. En cuanto a la tecnología, si además se recurre a las ruedas desecantes, se incrementaría este último ahorro de superficie.

España se puede considerar un país con las condiciones ideales para la instalación de los sistemas de refrigeración solar, de hecho, más del 50% de las instalaciones encontradas se encuentran en nuestro país. En mi modesta opinión, creo que si en el futuro se siguiera invirtiendo en esta tecnología, se reducirían notablemente las emisiones de contaminantes perjudiciales para el medio ambiente, y además se ahorraría bastante en combustibles fósiles, siendo esta una fuente contaminable, agotable y más cara para nuestra economía.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Desideri, U., Proietti, S., Sdringola Paolo, 2009, *Solar-powered cooling systems: Technical and economic analysis on industrial refrigeration and air-conditioning applications*, *Applied Energy*, Vol. 86, pp.1376–1386,
- [2] Argem, *Ficha sobre ahorro energético en el hogar*, *Consejería de Economía, Industria e Innovación de la Región de Murcia*
- [3] Aiguasol, *Refrigeración Solar*, 2010, <http://aiguasol.coop/>
- [4] IDAE, *Energía Solar en España, Estado actual y perspectivas*, 2007,
- [5] IDAE, *Evolución superficie Solar, Informe Estadístico EE.RR*, 2015
- [6] IDAE, *Manual de Energía Solar Térmica*, 2006, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
- [7] Miliarium, *Energía solar térmica*
- [8] Tuscany Solar, <http://www.tuscanydesignbuild.com/tuscanySolar.html>
- [9] Amordad Solar Group
- [10] IDAE, *Evaluación del potencial de climatización con energía solar térmica en edificios*, estudio técnico 2011-2020
- [11] Solar thermal world, <http://www.solarthermalworld.org/>
- [12] Junta Castilla y León, Medio Ambiente, Frío Solar, <http://www.medioambiente.jcyl.es>
- [13] Fenercom, *Guía del frío solar*, 2011, Comunidad de Madrid
- [14] Absorsistem, funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua, alimentado por agua caliente, <http://www.absorsistem.com/tecnologia/absorcion/funcionamiento-del-ciclo-de-absorcion-de-simple-efecto-con-bromuro-de-litio-y-agua>
- [15] López Alonso, A., Profesor de la Universidad de A Coruña (U.D.C), *Energía y Propulsión*, <http://www.udc.es/dep/enerxiaepulsion/PROFEMAQ/alonso.htm>
- [16] SlideShare, Best Practice Catalogue
- [17] Vicente Soltero, J.A., *PFC Análisis de Sistemas de Refrigeración Solar por Absorción y Adsorción*, 2015. Universidad de Sevilla.
- [18] M. Mujahid Rafique et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*
- [19] S. Techajunta et al., *Experiments in a solar simulator on solid desiccant regeneration and air dehumidification for air conditioning un a tropical humid climate*, *Renewable Energy* 17 (1999) 549-568
- [20] Airalia, Los deshumidificadores desecantes, <http://www.airalia.es/deshumidificadores/deshumidificadores-desecantes/>

- [21] C.X Jia et al., *Experimental comparison of two honeycombed desiccant wheels fabricated with silica gel and composite desiccant material*, *Energy Conversion and Management* 47 (2006) 2523-2534.
- [22] X. Zheng et al., *Recent progress son desiccant materials for solid desiccant cooling systems*, *Energy* 74 (2014) 280-294.
- [23] M. Sultan et al., *An overview of solid desiccant dehumidification and air conditioning systems*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 46 (2015) 16–29
- [24] Archibald J., *A new desiccant evaporative coolin cycle for solar air conditioning and hot wáter heating*, *American Solar Roofing Company, Annandale, Va. 2003*
- [25] T.S. Ge et al., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*
- [26] Arizona Luxury Real Estate Specialist
http://www.nicholasmccconnell.com/Desert_Mountain_High_School_Real_Estate.html
- [27] Es Radio, <http://esradio.libertaddigital.com/galicia/2016-03-24/inditex-invertira-mas-de-90-millones-en-la-ampliacion-de-su-sede-en-arteixo-1276570505/>
- [28] Refrigeración solar por absorción en edificios del sector terciario
- [29] Madrid más D, *Las Regiones Biogeográficas de Europa: Sus Climas y Otros Factores Formadores del Suelo*, <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/12/07/80472>
- [30] Icogen (Broad), *catálogo de máquinas de absorción*, <http://icogen-sa.com/productos-servicios/absorci%C3%B3n-broad.html>
- [31] Carrier, *catálogo de máquinas de absorción*, http://www.carrier.es/products/Chiller_HeatPumps/Absorption_ranges.htm
- [32] ClimateWell, *catálogo de máquinas de absorción*, http://www.solarcombiplus.eu/docs/SolarCombi_ClimateWell_trainingmaterial4.pdf
- [33] Absorsistem (Thermax), *catálogo de máquinas de absorción*, <http://www.absorsistem.com/productos/thermax/catalogos>
- [34] Absorsistem (Yazaki), *catálogo de máquinas de absorción*, <http://www.absorsistem.com/productos/yazaki>
- [35] Johnson Controls (York), *catálogo de máquinas de absorción*, http://www.johnsoncontrols.com/es_latinamerica/buildings/hvac-equipment/chillers
- [36] Invensor, *catálogo de máquinas de adsorción*, <http://www.invensor.com/es/productos/sistemas-de-refrigeracion.htm>
- [37] Mayekawa, *catálogo de máquinas de adsorción*, <http://www.mayekawausa.com/products/coolingsystems/adref.html>
- [38] ICOGEN S.A. (Nishiyodo), *catálogo de máquinas de adsorción*, <http://icogen-sa.com/productos-servicios/adsorci%C3%B3n-nishiyodo.html>
- [39] SorTech, *catálogo de máquinas de adsorción*, <http://www.sortech.de/en/technology/adsorption/>
- [40] Advantix, *catálogo de elementos de ruedas desecantes*, http://www.bosinternational.com/?page_id=42

8. ANEXOS

ANEXO 1: Lista de instalaciones

A. Anexo 1.1. Instalaciones con absorción

Localización	Ciudad	Aplicación	Tipo de captador	Área de captación [m2]	Potencia nominal de refrigeración [kW]	Tanque de almacenamiento [m3]	Contribución a refrigeración	Potencia de refrigeración auxiliar [kW]
Australia	Ipswich	Hospital	Parabólico de seguimiento solar	560	300	6		
Australia	Melburne	Hospital	Tubo de vacío	300	500	10		
Austria	Eberstalzell	Oficina	Placa plana	1000	80	85	70%	35
Austria	Gleisdorf	Oficina	Placa plana	240	35	4.5		
Austria	Gleisdorf	Oficina	Placa plana	100	24	20		
Austria	Graz	Oficina	Placa plana	350	105	2		
Austria	Haid	Oficina	Tubo de vacío	70	70	1		
Austria	Rohrbach	Oficina	Placa plana	120	30	4	0.23%	100
Austria	Saxen	Oficina	Placa plana	85	30	9		
Austria	St. Veit a.d. Glan	Oficina	Placa plana	77	35	1		
Austria	Trofaiach	Oficina	Placa plana	100	70	18.3		
Alemania	Berlín	Oficina	Tubo de vacío	348	44	1.6		
Alemania	Berlín	Oficina	Placa plana	229	70	6		
Alemania	Colonia	Oficina	Tubo de vacío	176	70			
Alemania	Langensteinbach	Oficina	Cilindro parabólico	180	54			
Alemania	Langeau	Oficina	Tubo de vacío	45	35	2	10%	
Alemania	Miesbach	Banco	Placa plana	100	20	7.5		

Alemania	Operhausen	Oficina y laboratorio	Tubo de vacío	108	58			
Alemania	Rodewisch	Colegio	Placa plana	100	32			
Bélgica	Bruselas	Oficina	Placa plana	81.1	35	4		
Canada	Ontario	Casa para jubilados	Tubo de vacío	520	105	9		315
China	Beijing	Oficina	Tubo de vacío	1018	200			
China	Jiangmen	Multiuso	Placa plana	500	100			
China	Qingdao	Oficina	Placa plana	670	500			
China	Rushan	Sala de exposición	Tubo de vacío	540	176	12		
Chipre	Nicosia	Panadería	Tubo de vacío	120	70.3	6.8	59%	
Dinamarca	Skive	Oficina	Placa plana	265	70	40	15%	400
EAU	Abu Dahbi	Museo	Placa plana	1134	400	26	25%	
EAU	Dubai	Oficina	Tubo de vacío	161	60		30%	
EAU	Dubai	Oficina	Tubo de vacío	200	60	26	25%	
EEUU	Arizona	Colegio	Placa plana	4865	1750	34.5	65%	
España	Arteixo	Oficina	Placa plana	1620	170	60	15%	
España	Barakaldo	Auditorio	Placa plana	150	229			
España	Barcelona	Oficina	Tubo de vacío	120	105			
España	Barcelona	Laboratorio	Placa plana	81	35	6	4%	323
España	Benidorm	Hotel	Tubo de vacío	345	125		30%	
España	Canarias	Hotel	Placa plana	2700	175.8	4.5		
España	Canarias	Oficina	Placa plana	68.4	35.2	6		
España	Cornelia de Valles	Oficina	Cilindro parabólico	214	105			
España	Derio	Hotel	Placa plana	160	105	0.6	100%	
España	Derio	Residencia	Tubo de vacío	21.6	10	0.6	65%	
España	El Oso	Industria	Placa plana	504	105	15		

España	Fustinana	Residencia de jubilados	Tubo de vacío	102	105			
España	Madrid	Oficina	Tubo de vacío	72	105			
España	Madrid	Centro deportivo	Tubo de vacío	507	170			
España	Madrid	Oficina	Placa plana	111	105			
España	Madrid	Laboratorio	Placa plana y tubo de vacío	100	35	2		
España	Madrid	Oficina	Tubo de vacío	204	390			
España	Madrid	Investigación	Placa plana	83.4	17.6	3		
España	Málaga	Residencia	Placa plana	34	10		81%	
España	Málaga	Oficina	Tubo de vacío	200	35	10		
España	Pamplona	Oficina	Tubo de vacío	240	350			
España	Santiago de Compostela	Oficina	Placa plana	600	115		20%	
España	Sevilla	Universidad	Lineales de Fresnel	352	175			
España	Sevilla	Laboratorio	Placa plana	151	35		11%	
España	Tarragona	Oficina	Tubo de vacío	96	35	5		
España	Toledo	Oficina	Tubo de vacío	750	252			
España	Valencia	Oficina	Placa plana	45	10	2.5	27%	
España	Valencia	Oficina	Placa plana	660	162	10		
España	Valladolid	Oficina	Placa plana y tubo de vacío	77.5	35	8	100%	
Francia	Argentuil	Oficina	Tubo de vacío	300	105			
Francia	Banyuls	Bodega	Tubo de vacío	130	52	1	100%	
Francia	Basse Terre	Oficina	Tubo de vacío	123	35	0	38%	57
Francia	Le Port	Industria	Placa plana	100	35			
Francia	Maclas	Residencia	Tubo de vacío	24	10			
Francia	Port-Louis	Colegio	Tubo de vacío	430	175	3		
Francia	Saint Denis	Oficina	Tubo de vacío	90	35	0.5		
Francia	Saint Pierre	Universidad	Placa plana	90	30	1.5		

Francia	Sainte Maxime	Edificio público	Tubo de vacío	90	35	1.5		
Francia	Sophia Antipolis	Oficina y laboratorio	Tubo de vacío	90	35	0.3	47%	40
Francia	Sophia Antipolis	Oficina	Tubo de vacío	570	210	1		
Francia	Talence	Laboratorio	Tubo de vacío	90	35	1.5		
Francia	Vignola	Oficina	Tubo de vacío	90	35			
Grecia	Atenas	Oficina	Tubo de vacío	615	168			
Grecia	Atenas	Oficina	Placa plana	160	35			
Grecia	Creta	Hospital	Placa plana	500	70	15	58%	
Grecia	Creta	Hotel	Placa plana	448	105	20		
Grecia	Heraklion	Oficina	Placa plana	300	125	20	78%	160
Grecia	Rethymo	Hotel	Placa plana	448	105			
India	Haryana	Laboratorio	Cilindro parabólico	288	100			
Italia	Bolzano	Centro de educación	Tubo de vacío	615	300	10	32%	930
Italia	Bolzano	Centro de educación	Tubo de vacío	595	300	8		340
Italia	Bolzano	Centro de enfermería	Tubo de vacío	550	250	8		555
Italia	Bolzano	Centro de bomberos	Placa plana	105	175	12.6		145
Italia	Como	Oficina	Tubo de vacío	340	480			
Italia	Como	Librería	Tubo de vacío	260	280			
Italia	Correggio	Industria	Tubo de vacío	63	44			
Italia	Imola	Colegio	Tubo de vacío	70	35			
Italia	Pergine	Oficina	Tubo de vacío	240	105		47%	120
Italia	Roma	Mayoristas, oficinas y comedor	Placa plana	3000	700	30		
Italia	Trento	Oficina	Placa plana	265	108	4	70%	

Jamaica	Kington	Oficina	Placa plana	982	600	11	50%	
Kosovo	Pristina	Investigación	Placa plana	227	108	4		
Kosovo	Pristina	Oficinas	Placa plana	227	90	4	75%	30
Portugal	Lisboa	Banco	Placa plana	1579	545	20		
Portugal	Sintra	Oficina	Cilindro parabólico	250	70			
Singapur	Singapur	Colegio	Placa plana	3900	1500	6	45%	
Sudáfrica	Pretoria	Hospital	Tubo de vacío	200	35	6	45%	
Turquía	Dalaman	Hotel	Parabólico de seguimiento solar	180	150			

Tabla 24: Lista de instalaciones con absorción

B. Anexo 1.2. Instalaciones con adsorción

Localización	Ciudad	Aplicación	Tipo de captador	de COP	Área de captación [m2]	Potencia nominal de refrigeración [kW]	Tanque de almacenamiento [m³]	Contribución a refrigeración	Potencia auxiliar de refrigeración [kW]
Alemania	Friburgo	Restaurante	Placa plana	0.44	22	5.5	2	30%	
Alemania	Friburgo	Hospital	Tubo de vacío	0.6	230	70	6	32%	
Austria	Thening	Vivienda	Placa plana	0.6	40	5.5	18	100%	0
China	Shsangai	Oficina	Placa plana	0.4	90	17	2.5	72%	
España	Murcia	Almacén	Tubo de vacío		3600	1210		85%	
Francia	Perpignan	Oficina	Placa plana	0.6	25	7.5	0.6	100%	0
Grecia	Victoria	Oficina	Placa plana	0.6	2700	750		66%	
Holanda	Petten	Vivienda	Placa plana	0.3-0.5	15	2.5			
Jordania	Aqaba	Vivienda	Tubos de vacío	0.6	50	15		72%	42.5

Tabla 25: Lista de instalaciones con adsorción

C. Anexo 1.3. Instalaciones con ruedas desecantes

Localización	Ciudad	Aplicación	Tipo de captador	Área de captación [m ²]	Potencia nominal de refrigeración [kW]	Tanque de almacenamiento [m ³]	Contribución a refrigeración	Potencia de refrigeración auxiliar [kW]
Alemania	Berlin		Tubo de vacío	550	188			
Alemania	Friburgo	Cámara de comercio	Placa plana	100	60			
Austria	Hartberg	Oficinas	Tubo de vacío	12	30	2	60%	50-30%
China	Shangai		Tubo de vacío	680	188			

Tabla 26: Lista de instalaciones con rueda desecante

ANEXO 2: Datos técnicos de los fabricantes

A. Anexo 2.1. ABSORCIÓN

- **BROAD**

Tipo BYH		Tamaños/Modelos		20	50	75	100	125	150	200	250	300	400	500	600	800	1.000	
Datos Chiller		Ud																
Refrigeración	Capacidad agua fría	kW	233	582	872	1.163	1.454	1.745	2.326	2.908	3.489	4.652	5.815	6.978	9.304	11.630		
	Caudal agua fría ($\Delta t = 7^{\circ}\text{C}$)	m ³ /h	28,6	71,4	107	143	179	214	286	357	429	571	714	857	1.143	1.429		
	Caudal agua caliente ($\Delta t = 15^{\circ}\text{C}$)	m ³ /h	10,2	25,5	38,2	51,0	63,6	76,4	102,0	127,0	153,0	204	255	306	408	510		
	Capacidad agua de torre	kW	397	992	1.487	1.983	2.479	2.975	3.966	4.958	5.958	7.941	9.924	11.907	15.874	19.848		
	Caudal agua torre ($\Delta t = 7^{\circ}\text{C}$)	m ³ /h	48,8	122	183	244	305	366	488	610	733	977	1.221	1.465	1.953	2.442		
Potencia eléctrica	kW	1,7	4,3	4,6	6,8	6,8	6,8	10,2	10,2	11,7	13,2	17,7	20,7	25,9	34,9			
Peso solución BrLi	t	1,0	2,2	2,8	3,4	4,4	4,9	7,1	7,4	10,6	12,1	14,8	18,1	24,2	30,5			
Peso unidad en operación	t	5,0	9,0	11,0	13,0	15,0	18,0	24,0	30,0	35,0	45,0	51,0	63,0	72,0	92,0			

Figura 52: Datos característicos de los modelos BH de Broad [30]

Tipo BYDH		Tamaños/Modelos		20	50	75	100	125	150	200	250	300	400	500	600	800	1.000	
Datos Chiller		Ud																
Refrigeración	Capacidad agua fría	kW	209	512	767	1.023	1.279	1.535	2.046	2.558	3.069	4.092	5.115	6.138	/	/		
	Caudal agua fría ($\Delta t = 7^{\circ}\text{C}$)	m ³ /h	25,2	62,9	94	125	157	188	251	313	376	503	628	754	/	/		
	Caudal agua caliente ($\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$)	m ³ /h	24,6	60,0	90,0	120,0	151,0	181,0	241,0	301,0	361,0	482	603	723	/	/		
	Capacidad agua de torre	kW	484	1.187	1.772	2.365	2.959	3.552	4.730	5.917	7.096	9.461	11.826	14.191	/	/		
	Caudal agua torre ($\Delta t = 7^{\circ}\text{C}$)	m ³ /h	59,5	146	218	291	364	437	582	728	873	1.164	1.455	1.746	/	/		
Potencia eléctrica	kW	2,5	2,5	5,3	5,7	5,7	5,7	8,6	10,1	10,1	13,9	13,8	17,5	/	/			
Peso solución BrLi	t	0,7	1,7	2,2	2,4	3,2	3,5	5,5	6,0	8,2	8,9	11,7	14,5	/	/			
Peso unidad en operación	t	4,0	7,0	9,5	11,5	14,0	16,0	22,0	26,0	31,0	37,0	44,0	50,0	/	/			

Figura 53: Datos característicos de la serie BDH de Broad [30]

Tipo BYS		Tamaños/Modelos		20	50	75	100	125	150	200	250	300	400	500	600	800	1.000	
Datos Chiller		Ud																
Refrigeración	Capacidad agua fría	kW	233	582	872	1.163	1.454	1.745	2.326	2.908	3.489	4.652	5.815	6.978	9.304	11.630		
	Caudal agua fría ($\Delta t = 7^{\circ}\text{C}$)	m ³ /h	29	71	107	143	179	214	286	357	429	571	714	857	1.143	1.429		
	Consumo vapor	kg/h.	251	628	941	1.255	1.569	1.883	2.511	3.138	3.766	5.021	6.276	7.532	10.042	12.550		
	Capacidad agua de torre	kW	397	992	1.487	1.983	2.479	2.975	3.966	4.958	5.958	7.941	9.924	11.907	15.874	19.848		
	Caudal agua torre ($\Delta t = 7^{\circ}\text{C}$)	m ³ /h	49	122	183	244	305	366	488	610	733	977	1.221	1.465	1.953	2.442		
Potencia eléctrica	kW	1,7	4,3	4,6	6,8	6,8	6,8	10,2	10,2	11,7	13,2	17,7	20,7	25,9	34,9			
Peso solución BrLi	t	0,8	1,9	2,6	3,0	4,1	4,6	6,7	7,5	9,9	11,2	14,6	17,5	22,7	28,2			
Peso unidad en operación	t	4,5	8,5	10,0	13,0	16,0	18,0	24,0	30,0	35,0	43,0	54,0	63,0	75,0	85,0			

Figura 54: Datos característicos de la serie BS de Broad [30]

Tipo BYDS		Tamaños/Modelos		20	50	75	100	125	150	200	250	300	400	500	600	800	1.000	
Datos Chiller		Ud																
Refrigeración	Capacidad agua fría	kW	233	582	872	1.163	1.454	1.745	2.326	2.908	3.489	4.652	5.815	6.978	/	/		
	Caudal agua fría ($\Delta t = 7^{\circ}\text{C}$)	m ³ /h	28,6	71,4	107	143	179	214	286	357	429	571	714	857	/	/		
	Consumo vapor	kg/h.	459	1.148	1.722	2.296	2.870	3.443	4.591	5.739	6.887	9.183	11.478	13.774	/	/		
	Capacidad agua de torre	kW	526	1.317	1.975	2.633	3.292	3.950	5.259	6.575	7.892	10.525	13.151	15.784	/	/		
	Caudal agua torre ($\Delta t = 7^{\circ}\text{C}$)	m ³ /h	64,7	162	243	324	405	486	647	809	971	1.295	1.618	1.942	/	/		
Potencia eléctrica	kW	2,5	2,5	5,3	5,7	5,7	5,7	8,6	10,1	10,1	13,9	13,8	17,5	/	/			
Peso solución BrLi	t	0,7	1,7	2,2	2,4	3,2	3,5	5,5	6,0	8,2	8,9	11,7	14,5	/	/			
Peso unidad en operación	t	4,0	7,0	9,5	11,5	14,0	16,0	22,0	26,0	31,0	37,0	44,0	49,0	/	/			

Figura 55: Datos característicos de la serie BS de Broad [30]

- **CARRIER**

16LJ		11	12	13	14	21	22	23	24	31	32	41	42	51	52	53
Capacidad de refrigeración	kW	264	316	387	475	545	633	738	844	949	1055	1178	1319	1477	1653	1846
Sistema de agua enfría*																
Caudal	l/s	11,4	13,6	16,7	20,4	23,5	27,3	31,8	36,3	40,9	45,4	50,7	56,8	63,6	71,2	79,5
Caída de presión	kPa	55	60	36	39	35	37	74	79	76	80	75	75	62	32	42
Conexión (ANSI)	pulg.	3	3	4	4	5	5	5	5	6	6	8	8	8	8	8
Volumen de retención	m³	0,12	0,13	0,15	0,17	0,22	0,24	0,28	0,30	0,34	0,36	0,46	0,48	0,65	0,71	0,77
Sistema del agua de refrigeración*																
Caudal	l/s	17,0	20,4	25,0	30,7	35,2	40,9	47,7	54,4	61,3	68,1	76,1	85,2	95,4	106,7	119,2
Caída de presión	kPa	36	39	105	111	108	112	103	106	97	98	98	102	146	88	117
Conexión (ANSI)	pulg.	5	5	5	5	6	6	8	8	8	8	10	10	12	12	12
Volumen de retención	m³	0,35	0,38	0,43	0,48	0,60	0,65	0,72	0,79	0,99	1,06	1,25	1,35	2,03	2,18	2,32
Sistema de agua caliente*																
Caudal	l/s	10,4	12,4	15,2	18,7	21,4	24,9	29	33	37	41	46	52	58	65	73
Caída de presión	kPa	31	12	29	32	30	31	30	30	29	29	28	28	28	37	49
Conexión (ANSI)	pulg.	4	4	4	4	5	5	6	6	6	6	8	8	8	8	8
Volumen de retención	m³	0,09	0,10	0,12	0,13	0,17	0,18	0,20	0,22	0,27	0,29	0,34	0,36	0,44	0,48	0,51
Conexión del disco de seguridad	pulg.	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
Longitud (L)	mm	2720	2720	3740	3740	3830	3830	4860	4860	4990	4990	5070	5070	5200	5740	6240
Anchura (W)	mm	1295	1295	1295	1295	1455	1455	1455	1455	1515	1515	1615	1615	1950	1950	1950
Altura (H)	mm	2215	2215	2215	2215	2350	2350	2350	2350	2620	2620	2870	2870	3200	3200	3200
Espacio para retirada de tubos	mm	2400	2400	3400	3400	3400	3400	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4600	5200	5700
Peso en orden de funcionamiento	kg	4000	4200	5200	5500	6700	7100	8200	8700	10600	11100	12900	13400	18200	19700	21100
Peso máx. de transporte	kg	3500	3600	4500	4700	5700	6000	7000	7300	9000	9400	10800	11200	15100	16400	17600
Peso total de transporte	kg	3500	3600	4500	4700	5700	6000	7000	7300	9000	9400	10800	11200	15100	16400	17600
Método de transporte	Una pieza															
Alimentación	400 V-3 fases-50 Hz															
Potencia aparente	kVA	4,0	4,0	4,0	4,0	5,8	5,8	5,9	5,9	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Corriente eléctrica total	A	6,2	6,2	6,2	6,2	8,9	8,9	9,0	9,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
Bomba de absorbente	kW	1,1	1,1	1,1	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	A	2,8	2,8	2,8	2,8	5,5	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Bomba de refrigerante	kW	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	A	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
Bomba de purga	kW	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	A	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Calentador de célula de paladio	W	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Circuito de control	W	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400

Leyenda

* De acuerdo con ARI 560 - 2000
 12,2→ 6,7°C (factor de ensuciamiento = 0,0176 m² K/kW)
 29,4→ 38,4°C (factor de ensuciamiento = 0,044 m² K/kW)
 95,0→ 86,0°C (factor de ensuciamiento = 0,0176 m² K/kW)

** Para una selección fuera de las condiciones de las normas del ARI, póngase en contacto con Carrier.

Figura 56: Datos técnicos de la serie 16LJ de Carrier [31]

16TJ		11	12	13	14	21	22	23	24	31	32	41	42	51	52	53
Capacidad de refrigeración	kW	352	422	527	633	738	844	985	1125	1266	1407	1582	1758	1969	2215	2461
Sistema de agua enfría*																
Caudal	l/s	15,1	18,2	22,7	27,3	31,8	36,3	42,4	48,4	54,5	60,6	68,1	75,7	84,8	95,4	106,0
Caída de presión	kPa	49	51	63	66	59	62	41	44	47	51	41	44	38	51	66
Conexión (ANSI)	pulg.	4	4	4	4	5	5	6	6	6	6	8	8	8	8	8
Volumen de retención	m³	0,12	0,13	0,15	0,17	0,22	0,24	0,28	0,30	0,34	0,36	0,46	0,48	0,65	0,71	0,77
Sistema del agua de refrigeración*																
Caudal	l/s	22,7	27,3	34,1	40,7	47,7	54,5	63,6	72,7	81,8	90,8	102,2	113,6	127,2	143,1	159,0
Caída de presión	kPa	34	36	31	36	31	34	64	69	54	56	59	63	41	54	70
Conexión (ANSI)	pulg.	5	5	5	5	6	6	8	8	8	8	10	10	12	12	12
Volumen de retención	m³	0,35	0,38	0,43	0,48	0,60	0,65	0,72	0,79	0,99	1,06	1,25	1,35	2,03	2,18	2,32
Sistema de vapor																
Consumo	kg/h	780	940	1170	1410	1640	1880	2190	2500	2810	3120	3510	3900	4370	4920	5460
Entrada de vapor	pulg.	5	5	5	6	6	6	8	8	8	8	8	8	10	10	10
Salida de desagüe	pulg.	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	2	2	2-1/2	2-1/2	2-1/2	2-1/2	2-1/2
Válvula de control	pulg.	2	2	2-1/2	2-1/2	2-1/2	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5
Válvula de corte	m²	2	2	2-1/2	2-1/2	2-1/2	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5
Longitud (L)	mm	2680	2681	3690	3690	3770	3770	4850	4850	4910	4910	4960	4960	5050	5590	6090
Anchura (W)	mm	1295	1295	1295	1295	1455	1455	1455	1455	1515	1515	1615	1615	1950	1950	1950
Altura (H)	mm	2215	2215	2215	2215	2350	2350	2350	2350	2620	2620	2870	2870	3200	3200	3200
Espacio para retirada de tubos	mm	2400	2400	3400	3400	3400	3400	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4600	5200	5700
Peso en orden de funcionamiento	kg	3900	4100	5000	5200	6400	6700	7800	8200	10100	10500	12200	12700	17400	18900	20100
Peso máx. de transporte	kg	3400	3600	4400	4600	5600	5800	6800	7100	8800	9100	10500	10800	14700	15900	17000
Método de transporte	Una pieza															
Alimentación	400 V-3 fases-50 Hz															
Potencia aparente	kVA	4,0	4,0	4,0	4,0	5,8	5,8	5,9	5,9	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Corriente eléctrica total	A	6,2	6,2	6,2	6,2	8,7	8,7	9,0	9,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
Bomba de absorbente n° 1	kW	1,1	1,1	1,1	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	A	2,8	2,8	2,8	2,8	5,5	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Bomba de refrigerante	kW	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	A	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
Bomba de purga	kW	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	A	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Calentador de célula de paladio	W	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Circuito de control	W	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300

Leyenda

* De acuerdo con ARI 560 - 2000
 12,2→ 6,7°C (factor de ensuciamiento = 0,0176 m² K/kW)
 29,4→ 38,4°C (factor de ensuciamiento = 0,044 m² K/kW)
 Vapor saturado 10 kPa

** Para una selección fuera de las condiciones de las normas del ARI, póngase en contacto con Carrier.

Figura 57: Datos técnicos de la serie 16TJ de Carrier [31]

- THERMAX

DESCRIPCIÓN		UNIDAD	MODELOS					
			LT-10 C	LT-12 C	LT-14 C	LT-16 C	LT-18 C	LT-21 C
CAPACIDAD FRIGORÍFICA NOMINAL		TR	100	120	140	160	180	210
		kW	352	422	492	563	633	738
CIRCUITO AGUA REFRIGERADA	Caudal de agua	m ³ /h	55,0	66,0	77,0	88,0	99,0	115,5
	Temperatura entrada/salida	°C	12,2 / 6,7					
	Pérdida de carga	kPa	26,5	26,5	42,2	42,2	82,4	12,8
	Diámetro conexión	DN (")	150 (6)					
	Nº de pasos (evaporador)		2					
CIRCUITO AGUA DE ENFRIAMIENTO (TORRE)	Caudal de agua	m ³ /h	100	120	140	160	180	210
	Temperatura entrada	°C	29,4					
	Temperatura salida	°C	36,6					
	Pérdida de carga	kPa	36,3	40,2	58,8	63,7	38,2	42,2
	Diámetro conexión	DN (")	150 (6)					
	Nº de pasos (absorbedor)		2			1		
CIRCUITO AGUA CALIENTE	Caudal de agua	m ³ /h	74,9	89,6	104,7	119,2	134,5	156,8
	Temperatura entrada/salida	°C	90,6 / 85					
	Pérdida de carga	kPa	45,1	44,1	31,4	31,4	58,8	61,8
	Diámetro conexión	DN	150					
	Nº de pasos (generador)		4			3		
DATOS ELÉCTRICOS	Bomba de solución	kW (A)	1,5 (5,0)					
	Bomba de refrigerante	kW (A)	0,3 (1,4)					
	Bomba de vacío	kW (A)	0,75 (1,9)					
	Consumo eléctrico total	kVA	7,0					
	Condiciones suministro		415V (±10%), 50 Hz (±5%), c.a. III + Neutro					

Figura 58: Datos técnicos de la serie LT de Thermax [32]

DESCRIPCIÓN		UNIDAD	MODELOS								
			5G 3M C	5G 4K C	5G 4L C	5G 4M C	5G 5K C	5G 5L C	5G 6K C	5G 6L C	
CAPACIDAD FRIGORÍFICA NOMINAL		kW	844	960	1.090	1.192	1.326	1.453	1.631	1.786	
		COP	0,75								
CIRCUITO AGUA REFRIGERADA	Caudal de agua	m ³ /h	145,2	165,1	187,5	205,0	228,0	250,0	280,6	307,2	
	Temperatura entrada/salida	°C	12,0 / 7,0								
	Pérdida de carga	kPa	33,4	33,4	35,7	37,3	32,4	32,4	56,9	58,9	
	Diámetro conexión	DN (")	150 (6)	150 (6)				200 (8)		250 (10)	
	Nº de pasos (evaporador)		1+1								
CIRCUITO AGUA DE ENFRIAMIENTO (TORRE)	Caudal de agua	m ³ /h	240,0	273,0	310,0	339,0	377,0	414,0	464,0	508,0	
	Temperatura entrada	°C	29,4								
	Temperatura salida	°C	36,4								
	Pérdida de carga	kPa	70,6	76,5	80,4	86,3	71,6	74,6	61,8	63,8	
	Diámetro conexión	DN (")	200 (8)	200 (8)			250 (10)		300 (12)		
	Nº de pasos (absorbedor)		2+2								
CIRCUITO AGUA CALIENTE	Caudal de agua	m ³ /h	97,0	110,0	125,0	137,0	152,0	167,0	187,0	206,0	
	Temperatura entrada/salida	°C	90,0 / 80,0								
	Pérdida de carga	kPa	10,8	9,8	9,8	9,8	10,8	10,8	17,7	18,6	
	Diámetro conexión	DN (")	150 (6)	200 (8)				200 (8)		250 (10)	
	Nº de pasos (generador)		1+1								
DATOS ELÉCTRICOS	Bomba de solución	kW (A)	1,5 (5,0)		3,7 (11,0)		3,7 (11,0)		5,5 (14,0)		
	Bomba de refrigerante	kW (A)	0,3 (1,4)								
	Bomba de vacío	kW (A)	0,75 (1,8)								
	Consumo eléctrico total	kVA	6,9		11,2		11,2		13,4		
	Condiciones suministro		415V (±10%), 50 Hz (±5%), c.a. III + Neutro								

Figura 59: Datos técnicos de la serie 5G (I) de Thermax [32]

DESCRIPCIÓN		UNIDAD	MODELOS							
			5G 6M C	5G 6N C	5G 7K C	5G 7L C	5G 8K C	5G 8L C	5G 8M C	5G 8N C
CAPACIDAD FRIGORÍFICA NOMINAL		kW	2.145	2.338	2.465	2.672	3.024	3.277	3.647	3.942
		COP	0,75							
CIRCUITO AGUA REFRIGERADA	Caudal de agua	m ³ /h	368,9	402,2	424,0	459,6	520,1	563,7	627,3	678,0
	Temperatura entrada/salida	°C	12,0 / 7,0							
	Pérdida de carga	kPa	44,1	47,1	50,0	52,0	40,2	42,2	68,7	70,6
	Diámetro conexión	DN (")	250 (10)			350 (14)				
	Nº de pasos (evaporador)		1+1							
CIRCUITO AGUA DE ENFRIAMIENTO (TORRE)	Caudal de agua	m ³ /h	610,0	665,0	701,0	760,0	860,0	932,0	1.037,0	1.121,0
	Temperatura entrada	°C	29,4							
	Temperatura salida	°C	36,4							
	Pérdida de carga	kPa	48,1	51,0	6,6	74,6	61,8	64,7	99,1	102,0
	Diámetro conexión	DN (")	300 (12)		350 (14)		400 (16)			
Nº de pasos (absorbedor)		1+1		2+2						
Nº de pasos (condensador)		1+1								
CIRCUITO AGUA CALIENTE	Caudal de agua	m ³ /h	245,0	268,0	282,0	306,0	344,0	376,0	417,0	454,0
	Temperatura entrada/salida	°C	90,0 / 80,0							
	Pérdida de carga	kPa	37,3	37,3	42,2	42,2	15,7	16,7	26,5	26,5
	Diámetro conexión	DN (")	250 (10)		250 (10)		300 (12)			
	Nº de pasos (generador)		1+1							
DATOS ELÉCTRICOS	Bomba de solución	kW (A)	6,6 (17,0)		4,5 (13,0)			5,5 (17,0)		
	Bomba de refrigerante	kW (A)	1,5 (5,0)							
	Bomba de vacío	kW (A)	0,75 (1,8)							
	Consumo eléctrico total	kVA	18,1		15,2				18,1	
	Condiciones suministro		415V (±10%), 50 Hz (±5%), c.a. III + Neutro							

Figura 60: Datos técnicos de la serie 5G (II) de Thermax [32]

- **YAZAKI**

Datos nominales y características técnicas

Modelo YPC-ST	14SC	16SL	17S	18S	19S
Capacidad frigorífica (kW)	1055	1547	1705	2039	2373
Largo / Ancho / Alto (m)	5,1 / 1,9 / 2,3	6,0 / 2,3 / 2,6	5,9 / 2,3 / 2,6	7,0 / 2,3 / 2,8	8,0 / 2,3 / 2,8
Peso en funcionamiento (kg)	11030	17150	17510	20780	24190

Temperatura salida agua fría 7°C - Temperatura entrada agua torre 30°C.
Temperatura entrada vapor 8 psi.

Figura 61: Datos técnicos de la serie YPC de Yazaki [33]

Características técnicas

Modelo YIA			1A1	1A2	2A3	2A4	2B1	3B2	3B3	4B4	4C1	5C2	5C3
Dimensiones	Largo	mm	3720	4330	4940	5550	4940	5550	6160	6770	5550	6160	6770
	Ancho	mm	1760	1420			1580			1770			
	Alto	mm	2320			2640			3020				
Peso en funcionamiento kg			4950	5500	6130	6590	7900	8540	9490	10490	11400	12260	13620

Modelo YIA			6C4	7D1	7D2	8D3	8E1	9E2	10E3	12F1	13F2	14F3
Dimensiones	Largo	mm	7530	6160	6770	7530	6870	7630		8390		
	Ancho	mm	1770	2110	1670	2110	2290		2480			
	Alto	mm	3020	3540		3840		4240				
Peso en funcionamiento kg			14760	17890	19840	21800	24110	26830	29790	35550	39050	41140

Figura 62: Datos técnicos de la serie YIA de Yazaki [33]

B. Anexo 2.2. ADSORCIÓN

- *INVENSOR*

DATOS TÉCNICOS GENERALES		
Gama de potencia de enfriamiento	kW	4-12
COP máximo		0,65
Sobrepresión máxima	bar	4
Conexión eléctrica	V~, Hz	230, 50/60
Potencia eléctrica absorbida incl. bombas.	W	395

DATOS EN CONDICIONES NOMINALES		CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN	CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO	CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO
COP en condiciones nominales		0,6		
Valores de potencia	kW	10	26,7	16,7
Temperaturas en la entrada de la instalación de enfriamiento (IN)	°C	18	27	72
Temperaturas en la entrada de la instalación de enfriamiento (OUT)	°C	15	31,5	66
Posibilidades de aplicación de las temperaturas	°C	10-25	20-37	45-100
Caudales	L/h	2.900	5.100	2.500
Pérdidas de presión	mbar	400	400	300

Todos los datos son válidos para el funcionamiento con agua en los circuitos hidráulicos

Figura 63: Datos técnicos de la serie LTC de Invensor [36]

DATOS EN CONDICIONES NOMINALES		CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN	CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO	CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO
COP	-		0,52	
Potencia	kW	18	52,6	34,6
Temperaturas en la entrada de la instalación de enfriamiento (IN)	°C	18	27	85
Temperatura en la entrada de la instalación de enfriamiento (OUT)	°C	14	34,5	76,5
Caudales	L/h	3.900	6.000	3.600
Pérdida de presión	mbar	400	400	300
Sobrepresión máx.	bar		4	
Conexión eléctrica			230V~, 50/60Hz	

Todos los datos son válidos para el funcionamiento con agua en los circuitos.

Figura 64: Datos técnicos de la serie LTC de Invensor [36]

- *MAYAKAWA*

Items		models	Z-3515	Z-3525	Z-6025
Cooling Capacity		kW [Btu/h]	105 [358,260]	215 [733,580]	430 [1,467,160]
Chilled water	outlet temp.	°C [°F]	15 [59]	15 [59]	15 [59]
	flow rate	m ³ /h [GPM]	12.1 [53.3]	24.3 [107]	48.7 [214.4]
Heat source	inlet temp.	°C [°F]	68 [154.4]	68 [154.4]	68 [154.4]
	flow rate	m ³ /h [GPM]	20 [88.1]	40 [176.1]	80 [352.3]
Cooling water	inlet temp.	°C [°F]	27 [80.6]	27 [80.6]	27 [80.6]
	flow rate	m ³ /h [GPM]	50 [220.2]	99 [435.9]	198 [871.9]
Refrigerant pump		kW [HP]	0.3 [0.4]	0.55 [0.7]	1.1 [1.5]
Vacuum pump		kW [HP]	0.4 [0.5]	0.4 [0.5]	0.75 [1.0]
Outer Dimensions	L	mm [inch]	3,700 [145 ⁵ / ₈]	3,700 [145 ⁵ / ₈]	6,100 [240 ¹ / ₈]
	W	mm [inch]	1,500 [59]	2,450 [96 ¹ / ₂]	2,450 [96 ¹ / ₂]
	H	mm [inch]	2,800 [110 ¹ / ₄]	2,800 [110 ¹ / ₄]	2,800 [110 ¹ / ₄]
Net weight		kg [lbs]	6,600 [14,550]	10,000 [22,046]	15,000 [33,069]

Figura 65: Datos técnicos de la serie AdRef-Noa de Mayakawa [37]

- **NISHIYODO**

Modelo			ADCM1-180					
Tipo			Estimado					
			Económico	Estándar	Estándar	Estándar	Estándar	Estándar
CAPACIDAD	USRT	kWf	179	150	127	93	42	5
			630	528	446	329	148	18
COP			0,59	0,70	0,67	0,62	0,45	0,20
Agua Fria	IN	°C	12,0	11,2	10,5	9,6	8,2	7,1
	OUT	°C	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
	Caudal	m3/h	108	108	108	108	108	108
	Δ presión	mca	7	7	7	7	7	7
Agua torre refrigeración	IN	°C	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4
	OUT	°C	35,5	34,0	33,4	32,5	31,1	29,8
	Caudal	m3/h	240	240	240	240	240	240
	Potencia	kWt	1.696	1.287	1.107	857	476	111
Δ presión	mca	10	10	10	10	10	10	
Agua Caliente	IN	°C	90,0	90,0	80,0	70,0	60,0	50,0
	OUT	°C	83,1	85,1	75,7	66,6	57,9	49,4
	Caudal	m3/h	132	132	132	132	132	132
	Potencia	KW	1067	759	661	528	328	92
Δ presión	mca	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	
Electricidad	Tensión	V	200	200	200	200	200	200
	Frecuencia	Hz	60	60	60	60	60	60
	Potencia	kWe	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Aire comprimido	Presión	barg	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	Caudal	L/min	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60

Figura 66: Datos técnicos de la serie ADCM1-180 de Nishiyodo [37]

C. Anexo 2.3. RUEDA DESECANTE

- **ADVANTIX**

Thermal (Renewable) Capacity Data

Outdoor conditions at 86°F; 80% R.H.

Hot water at 194°F, 26 gpm flow, Cold water at 42.8°F, 35 gpm flow, 6 rows hot coil and 6 rows cold coil.⁽²⁾

Sensible Cooling	11,100 Btu/h	3.25 kW	17,000 Btu/h	4.98 kW	24,600 Btu/h	7.20 kW
Latent Cooling	21,500 Btu/h	6.30 kW	33,200 Btu/h	9.73 kW	47,400 Btu/h	13.9 kW
Total Cooling	32,600 Btu/h	9.55 kW	50,200 Btu/h	14.71 kW	72,000 Btu/h	21.1 kW
	2.72 TR		4.18 TR		6.0 TR	
Moisture Extraction	2.38 Gal/h		3.67 Gal/h		5.23 Gal/h	
Temperature Reduction	35.0°F		32.2°F		29.0°F	
Efficiency Rating ⁽³⁾	17.4 COP	59.3 EER	26.7 COP	91 EER	26.2 COP	90 EER

Figura 67: Datos técnicos de la serie DH (small) de Advantix [40]

Thermal Mode (Renewable)
Data & Capacity (Hot & Cold Water Operation)

Tested at conditions at 86°F; 70 % R.H. ^{(2) (3)}

Hot water at 185 F, 40 gpm flow; Cold water at 42.8 F, 66 gpm flow. ⁽⁴⁾						
Sensible Cooling	47,800 Btu/h	14.0 kW	69,000 Btu/h	20.2 kW	88,712 Btu/h	26.0 kW
Latent Cooling	99,000 Btu/h	29.0 kW	139,700 Btu/h	40.9 kW	184,248 Btu/h	54.0 kW
Total Cooling	146,800 Btu/h	43.0 kW	208,700 Btu/h	61.1 kW	272,960 Btu/h	80.0 kW
	12.2 TR		17.4 TR		22.8 TR	
Moisture Extraction	10.8 Gal/h		15.3 Gal/h		21.5 Gal/h	
Temperature Reduction	32°F		27°F		25°F	
Efficiency Rating ⁽⁵⁾	25.3 COP	86 EER	26.5 COP	90 EER	22.85 COP	78 EER

Figura 68: Datos técnicos de la serie DH (large) de Advantix (Fuente: Advantix)

Hybrid Mode (Renewable)
Simulating Solar Hot Water & Geothermal Cold Water Application
Data & Capacity (Simultaneous Hot & Cold Water + Electrical Operation) ^(a)

Tested at ambient conditions: 86°F; 70 % R.H.

Hot water at 176°F, 40 gpm flow; Cold water at 70°F, 66 gpm flow. Simulation of unit operating using solar or co-generation hot water. Cold water at 70°F that can be supplied from a geothermal cold water well in the south east region of the US from Georgia and south (Miami FL) or from a cooling tower from Georgia and north.		
Sensible Cooling	83,597 Btu/h	24.5 kW
Latent Cooling	155,253 Btu/h	45.5 kW
Total Cooling	238,850 Btu/h	70.0 kW
	20.0 TR	
Moisture Extraction	18 Gal/h	
Temperature Reduction	23.5°F	
Efficiency Rating ^(a)	8.2 COP	28 EER

Figura 69: Datos técnicos de la serie DB de Advantix (Fuente: Advantix)