

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Sistema de almacenamiento de energía térmica
basado en vapor en centrales termosolares. Análisis y
modelado

Autor: Marta Lidia Monar González

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Sistema de almacenamiento de energía térmica basado en vapor en centrales termosolares. Análisis y modelado

Autora:

Marta Lidia Monar González

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Profesor Contratado Doctor

Grupo de Termotecnia. Departamento de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Sistema de almacenamiento de energía térmica basado en vapor en centrales termosolares. Análisis y modelado

Autor: Marta Lidia Monar González

Tutor: Francisco 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, 2017

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi familia su apoyo y preocupación por que este trabajo llegara a su fin así como a todos mis amigos que me han animado a lo largo de esta última etapa. En el transcurso de estos años de carrera, además de todos los conocimientos adquiridos, me llevo a unas increíbles personas como son mis compañeros de clase. Me alegro mucho de haberlos conocido y haber compartido estos años tan importantes en mi vida. Así como a todos los profesores de los que he aprendido muchísimo. Agradecer la dedicación a mi tutor Javier Pino que me ha ido guiando en todos aquellos momentos que he tenido dificultados para avanzar.

Marta Lidia Monar González

Sevilla, 2017

Resumen

El objeto de este proyecto es el análisis y modelado del sistema de almacenamiento térmico basado en vapor de las centrales Termosolares. En primer lugar se explicaran los distintos tipos de tecnologías de concentración existentes y a continuación se profundizará en los sistemas de almacenamiento, en concreto, en el almacenamiento térmico basado en vapor. Se explicará tanto su funcionamiento como los elementos por los que está compuesto el sistema. Además, se calcularán las dimensiones del acumulador de vapor en función de la potencia de generación y presiones de almacenamiento. Partiremos de los datos reales de las centrales PS10, PS20 y Khi Solar One. Se comentarán las diferencias con el sistema de almacenamiento de sales fundidas y se obtendrán una serie de conclusiones de este tipo de sistema de almacenamiento, como pueden ser sus ventajas e inconvenientes.

Abstract

The purpose of this project is the analysis and modelling of the thermic storage system based on direct steam solar plants. I will start explaining the different concentrating solar technologies and then, I will describe the steam storage system, how it works and their main elements. Also, the dimensions of the steam accumulator will be calculated according to the power generation and storage pressures of the solar plant. We will depart from the real information of PS10, PS20 and Khi Solar One solar plants. There will be pointed the differences with the molten salt storage system and finally, there will be a conclusion of this type of storage system, like their advantages and disadvantages.

ÍNDICE

Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice de tablas	xi
Índice de ilustraciones	xii
1 Introducción	1
1.1 <i>El sol como fuente energética</i>	2
1.2 <i>Sistemas termosolares de concentración</i>	3
1.2.1 <i>Sistemas de canal parabólico</i>	7
1.2.2 <i>Sistema de receptor central</i>	8
1.2.3 <i>Discos parabólicos</i>	10
1.2.4 <i>Concentradores lineales de Fresnel</i>	11
1.3 <i>Configuración general de una central termosolar</i>	11
1.4 <i>Ventajas y factores clave del almacenamiento de energía</i>	13
2 Estado del arte. Centrales solares con sistema de almacenamiento basado en vapor	15
2.1 <i>Planta solar 10</i>	15
2.2 <i>Planta solar 20</i>	19
2.3 <i>Khi Solar One</i>	23
2.4 <i>Yanking Solar</i>	28
3 Sistemas de almacenamiento de energía. Acumulador de vapor	30
3.1 <i>Breve introducción de los sistemas de almacenamiento de energía en centrales solares</i>	30
3.2 <i>Concepto de múltiplo solar</i>	32
3.3 <i>Acumulador de vapor</i>	33
3.4 <i>Periodo de carga/descarga del acumulador de vapor</i>	37
3.5 <i>Elementos del sistema</i>	38
3.5.1 <i>Válvula de interrupción y válvula antirretorno</i>	38
3.5.2 <i>Válvulas de mantenimiento de presión</i>	40

3.5.3	Purgador de aire y rompedor de vacío	40
3.5.4	Válvula de seguridad	42
3.5.5	Drenaje	44
3.5.6	Purgador para controlar el nivel máximo	44
3.5.7	Estación reductora de presión a la salida	44
3.5.8	Equipo de inyección de vapor	51
3.5.9	Tuberías	52
3.5.10	Otros elementos	53
3.6	<i>Controles</i>	54
3.7	<i>Configuraciones típicas</i>	54
3.7.1	Acumulador en serie con el generador de vapor	54
3.7.2	Acumulador alejado del generador de vapor	55
3.7.3	Acumulador conectado al proceso de baja presión	55
3.7.4	Acumulador conectado en serie/paralelo al generador	56
3.7.5	Instalación de un by-pass en el acumulador	57
3.8	<i>Fabricantes de acumuladores industriales</i>	58
3.9	<i>Comparación con el almacenamiento en sales fundidas</i>	61
3.10	<i>Principal aplicación del sistema de almacenamiento basado en vapor</i>	64
4	Modelo acumulador de vapor	65
5	Simulaciones y análisis	70
5.1	<i>Análisis sistema de almacenamiento de la PS10</i>	70
5.1.1	Comparación con tanques de sales	80
5.2	<i>Análisis sistema de almacenamiento de la PS20</i>	82
5.3	<i>Análisis sistema de almacenamiento de Khi Solar One</i>	86
6	Conclusiones	90
7	Bibliografía y referencias	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos del receptor de Khi Solar One	25
Tabla 2 Velocidades del vapor	53
Tabla 3 Dimensiones acumulador Bepis	59
Tabla 4 Comparación características del almacenamiento en vapor y sales fundidas	61
Tabla 5 Análisis inicial PS10	73
Tabla 6 Evolución del tamaño del acumulador en función del tiempo de almacenamiento	73
Tabla 7 Evolución del tamaño del acumulador en función de la eficiencia del ciclo Rankine Presión receptor = 40 bar; Presión de vapor = 20 bar	75
Tabla 8 Evolución del tamaño del acumulador en función de la presión máxima de almacenamiento. Presión mínima = 20 bar	77
Tabla 9 Evolución del tamaño del acumulador a medida que aumenta el % de agua al final de la carga. Presión máxima = 40 bar; Presión mínima = 20 bar	78
Tabla 10 Comparación almacenamiento en sales y vapor	81
Tabla 11 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la caída de presión	84
Tabla 12 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la caída de presión	85
Tabla 13 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la presión mínima	88

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Relación de concentración	4
Ilustración 2 Comparación con máquina térmica.....	5
Ilustración 3 Ciclo Rankine.....	6
Ilustración 4 Variantes tecnológicas.....	7
Ilustración 5 Tubo receptor.....	8
Ilustración 6 Configuración central Termosolar.....	12
Ilustración 7 Configuración central Termosolar con almacenamiento y sistema auxiliar..	12
Ilustración 8 Receptor de la PS-10.....	16
Ilustración 9 PS10.....	16
Ilustración 10 Balance energético de la PS-10.....	17
Ilustración 11 Acumuladores de vapor de la PS10.....	18
Ilustración 12 Análisis producción PS10 10-02-08.....	19
Ilustración 13 PS20.....	19
Ilustración 14 Receptor PS20	20
Ilustración 15 Torre central de heliostatos y generación directa de vapor (DSG).....	20
Ilustración 16 Válvulas PS20.....	22
Ilustración 17 Vista del sistema de almacenamiento de la PS20.....	23
Ilustración 18 Helióstato de Khi Solar One	24
Ilustración 19 Receptor y torre Khi Solar One	25
Ilustración 20 Sistema de almacenamiento Khi Solar One	26
Ilustración 21 Khi Solar One.....	28
Ilustración 22 Planta solar Yanking (Beijing).....	29
Ilustración 23 Tanque Ruth	32
Ilustración 24 Eficiencia en función del MS y las horas de almacenamiento	33

Ilustración 25 Acumuladores de vapor de la PS10.....	34
Ilustración 26 Válvulas reguladoras de presión	35
Ilustración 27. Elementos de un acumulador de vapor	38
Ilustración 28 Válvula de retención de disco	39
Ilustración 29 Apertura y cierre de la válvula de retención de disco	39
Ilustración 30 Rompedor de vacío	40
Ilustración 31 Funcionamiento normal	41
Ilustración 32 Enfriamiento	41
Ilustración 33 En el punto de vacío.....	41
Ilustración 34. Válvula de seguridad ASME	42
Ilustración 35 Instalación válvula de seguridad	43
Ilustración 36 Estación reductora de presión general	45
Ilustración 37 Grupo reductor de presión	46
Ilustración 38 Válvula reductora de presión de acción directa	47
Ilustración 39 Válvula reductoras de presión con piloto	49
Ilustración 40 Válvula reductoras de presión en serie.....	50
Ilustración 41 Válvulas reductoras de presión en paralelo	50
Ilustración 42 Instalación de inyectores en un acumulador de vapor	51
Ilustración 43 Funcionamiento inyector de vapor	52
Ilustración 44 Mirilla	53
Ilustración 45 Acumulador en serie con el generador de vapor	54
Ilustración 46 Acumulador alejado del generador de vapor.....	55
Ilustración 47 Acumulador conectado al proceso de baja presión	56
Ilustración 48 Acumulador conectado en serie/paralelo al generador.....	57
Ilustración 49 Instalación de un by-pass en el acumulador	57
Ilustración 50 Acumulador Manara	58

Ilustración 51 Acumulador Bepis de 1 MPa y 200 °C	59
Ilustración 52 Esquema acumulador Sea CZ a.s.	60
Ilustración 53 Acumulador de Sahala Work´s	60
Ilustración 54 Evolución temperatura media de tanques	62
Ilustración 55 Esquema de bloques de una planta CCP con almacenamiento en sales fundidas	63
Ilustración 56 Esquema de principio de la planta PS10	71
Ilustración 57 Evolución del tamaño del acumulador en función del tiempo de almacenamiento	74
Ilustración 58 Evolución del tamaño del acumulador en función del rendimiento del ciclo Rankine	76
Ilustración 59 Evolución del tamaño del acumulador en función de la presión máxima de almacenamiento. Presión mínima = 20 bar	77
Ilustración 60 Evolución del tamaño del acumulador a medida que aumenta el % de agua al final de la carga. Presión máxima = 40 bar; Presión mínima = 20 bar	79
Ilustración 61 Volúmen específico de vapor saturado proporcionado por el acumulador para distintas caídas de presión	80
Ilustración 62 Comparación almacenamiento en sales y vapor	82
Ilustración 63 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la caída de presión. Presión máxima =120 bar	84
Ilustración 64 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la caída de presión. Presión mínima = 20 bar	86
Ilustración 65 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la presión mínima. Presión máxima =130 bar	88

1 INTRODUCCIÓN

Finalmente la industria no encontrará más recursos en Europa con el fin de satisfacer su prodigiosa expansión... sin duda se agotará el carbón. ¿Qué hará entonces la industria?

- Augustin Mouchot (1880)

Las energías renovables nacen del encarecimiento de los recursos fósiles, como el petróleo o el carbón. Aunque se considera una utopía el abastecimiento cien por cien renovable, poco a poco, están tomando un papel más importante en la civilización en la que vivimos. Muchas personas comentan que son las energías del futuro, por ser sostenibles con el medio ambiente que cada vez está más afectado por la contaminación, pero todavía queda camino por recorrer.

El futuro de las energías renovables es indiscutible. El peligro de la disminución del uso de combustibles fósiles como fuente de energía es un objetivo que persiguen la mayoría de las políticas internacionales pues el límite es inevitable. Todas las alternativas surgidas nos llevan hacia el camino de la sostenibilidad energética y los avances tecnológicos deben dirigirse hacia ese objetivo.

Desde tiempos inmemorables el sol ha sido venerado por ser un recurso fundamental de la vida. En la antigua Grecia, los dioses del sol eran Helios y Apollo, a los que se dedicaron multitud de templos. Los romanos fueron de los primeros en usar la energía solar en las viviendas con el uso del vidrio en las ventanas para atrapar la luz solar. En 1867, el científico Horace de Saussure desarrolló el primer colector solar y hace unos 100 años Augustin Mouchot produjo vapor para mover una turbina a partir de un colector solar.

La fuente principal de las energías renovables es el Sol ya que no solo calienta (energía térmica y fotovoltaica) sino que también da origen a los vientos, evapora el agua que pasa a lluvia o nieve llenando los embalses (energía hidráulica) y hace crecer las plantas (biomasa). El sol y la luna dan origen a las mareas (energía mareomotriz), con la ayuda del viento genera las olas (energía oleomotriz), al calentar la superficie del mar genera una diferencia de temperaturas entre la superficie y el fondo (energía térmica de los océanos) y es la causa de las corrientes del mar.

Ante la decadencia de los recursos fósiles, comienza a hacerse hincapié en el uso del sol como fuente energética y de aquí nacen los sistemas de energía solar. Como todos sabemos nos encontramos con el problema de que el Sol no está siempre que lo necesitamos. Suele estar presente en las horas que menos necesidades hay, es decir, durante el día. La demanda de energía durante el día es menor que la demanda de energía durante la noche, simplemente por el hecho de que la temperatura es menor al anochecer y conforme avanza el día hay más oscuridad. Trasladando este problema al ámbito industrial, una planta que produce constantemente una determinada potencia y de repente no puede producir porque no dispone del recurso necesario para mover la turbina, la planta comienza a funcionar a carga parcial y esto genera desajustes en los demás sistemas, en general, en su rendimiento.

Por ello, se sigue investigando lo que son los sistemas de almacenamiento de energía para grandes potencias, ya que los sistemas de energía como tal, existen desde hace millones de años y a pequeña escala hay sistemas de almacenamiento muy eficientes que pueden hacer que una planta pequeña siga operando sin necesidad de un sistema auxiliar tradicional.

Al hilo de la evolución de las renovables en la actualidad, uno de los caminos para aumentar el uso de la energía solar para producción de electricidad es el desarrollo de los sistemas de almacenamiento. A causa de la no coincidencia de la curva de producción y demanda, se ve necesario el uso de un sistema de almacenamiento para aprovechar la pérdida de energía que se tiene cuando se produce electricidad y no hay demanda o para producir electricidad en periodos de insolación.

Una vez investigados y desarrollados los sistemas de almacenamiento de energía, las energías renovables podrán competir con los actuales sistemas de producción de energía tradicionales, ya sea térmica, eléctrica, mecánica, entre otras tipologías.

Siendo un punto de inflexión para las renovables el desarrollo de las tecnologías de almacenamiento y mi motivación por las renovables, es de mi interés realizar este trabajo.

1.1 El sol como fuente energética

Al Sol lo podemos considerar como una fuente de calor de muy alta calidad por la alta temperatura a la que encuentra, unos 5777 grados Kelvin. Es un recurso energético abundante y en principio inagotable. Tiene la característica de ser renovable, se renueva y su distribución geográfica es otra de sus ventajas. Por otro lado, es intermitente, ya que de noche no disponemos de recurso solar

pero sí durante las horas de sol, también es variable porque en función del momento del día tiene más intensidad o menos y su densidad energética es relativamente baja.

La constante solar, definida como la cantidad de energía recibida en forma de energía solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, sufre variaciones con el tiempo, pero su valor ronda los 1367 W/m^2 .

Para lograr un modelo energético basado en fuentes renovables, generar electricidad a partir de la radiación solar es una de las opciones principales desde varios puntos de vista:

- Mejora la eficiencia del sistema
- Mitiga el cambio climático
- Puede sustituir las fuentes agotables
- Ofrece la seguridad del suministro eléctrico
- Permite acceder a la electricidad en zonas aisladas y deprimidas

1.2 Sistemas termosolares de concentración

Hay varias variantes tecnológicas de aprovechamiento de la energía solar, como los sistemas fotovoltaicos o los sistemas de energía solar de baja temperatura, pero este trabajo se centrará en los sistemas Termosolares de concentración, los cuales aprovechan la energía solar concentrando la radiación solar, como su propio nombre indica. No toda la radiación solar se puede concentrar, únicamente la de carácter direccional o mejor dicho, la componente directa de la radiación. La condición para tener radiación directa es que no haya nubes, entre otras condiciones.

Es importante concentrar para obtener altas temperaturas y por consiguiente tener alta exergía, variable muy importante para todo ingeniero ya que mide la calidad de la energía. La exergía representa el trabajo útil máximo que se puede obtener de un sistema al evolucionar este hasta llegar al equilibrio termodinámico con el medio ambiente. La radiación directa concentrada se convierte en calor que posteriormente podemos utilizarlo en multitud de procesos. Entre los procesos industriales que podemos utilizar este calor se encuentra la refrigeración por absorción, el calor de proceso, también podemos usarlo en procesos químicos y tratamiento de materiales, entre otros. En el proceso de conversión de la radiación solar en calor se producen muchas pérdidas, por ello se busca un alto grado de concentración con el fin de reducirlas. Las pérdidas

son proporcionales al área de captación (A) y la temperatura (T), como indico en la siguiente aproximación:

$$P_L \approx A * T^4$$

Cuando concentramos reducimos el área de captación y limitamos esas pérdidas. Además, la temperatura de operación es más alta cuanto mayor sea la relación de concentración. La relación de concentración geométrica, es el cociente entre el área del captador o “Ain” y el área del absorvedor o “Aout” y la relación de concentración de flujo viene a significar lo mismo pero se define en términos de Irradiancia que entra (Fout) y que sale (Fin) del concentrador. Como indico a continuación:

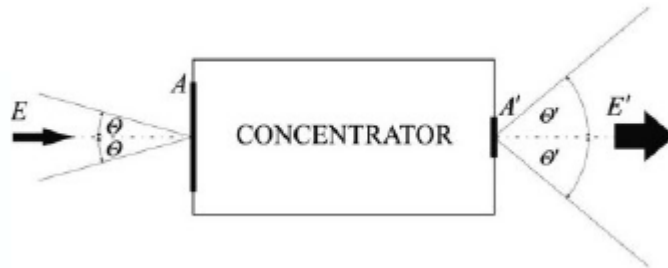


Ilustración 1 Relación de concentración

Fuente: Centrales Solares Manuel Silva

$$C_g = \frac{A_c}{A_{abs}} = \frac{A_{in}}{A_{out}}$$

$$C_{flux} = \frac{F_{out}}{F_{in}}$$

Lo ideal es que la relación geométrica y la de flujo sean iguales, es decir que la irradiancia que entra se conserve pero en la realidad esto no ocurre. Por lo que el cociente entre el flujo radiante a la entrada por el área de captación a la entrada es mayor que el cociente a la salida. Consecuentemente, la relación geométrica es mayor que la relación de flujo. La irradiancia se reduce a la salida del captador.

Con estos conceptos podemos definir lo que es el etendue:

$$A * \sin^2\theta = A' \sin^2\theta'$$

Idealmente el etendue se conserva.

Como en una máquina térmica, cuanto mayor es la temperatura del foco caliente y menor la del foco frío, mayor rendimiento obtendremos. En la ilustración 2 podemos ver una similitud entre el sistema concentrador (a la izquierda) y una máquina térmica (a la derecha).

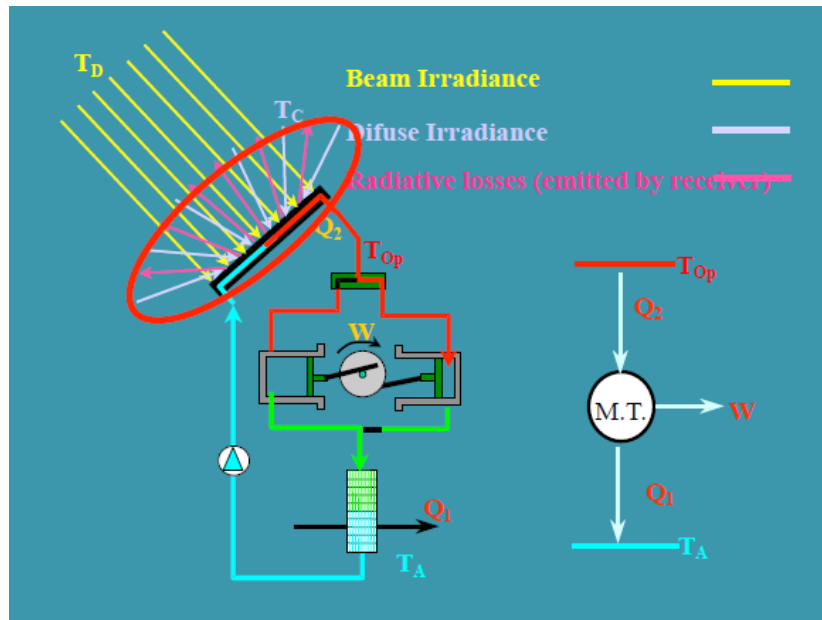


Ilustración 2 Comparación con máquina térmica

Fuente: Centrales Solares Manuel Silva

Los componentes principales de un sistema termosolar de concentración o central termosolar son:

- **Concentrador:** elemento encargado de reflejar la radiación solar. Es una superficie reflectante o espejo caracterizado por la reflectancia especular, es decir, la cantidad de radiación que refleja. Esta propiedad depende de la longitud de onda. La superficie reflectante ha de ser resistente a la intemperie y abrasión, no debe pesar mucho y ha de tener un coste razonable.
- **Receptor-absorbedor:** elemento en el que se produce la transformación de la radiación solar concentrada en energía térmica. Lo que se produce es el aumento de la energía interna de un fluido.
- **Fluido caloportador (HTF):** ha de tener una alta capacidad y conductividad térmica. Su densidad y viscosidad dependen de la temperatura en la que se encuentren. Hay que tener en cuenta su estado a temperatura ambiente, no deben ser corrosivos, tóxicos o inflamables y es importante tener en cuenta su coste, ya que no es lo mismo un fluido como el agua (muy barata) que el aceite térmico (el precio es mucho mayor). Los que se

suelen usar son los aceites térmicos, agua, sales fundidas, aire y en menor medida metales líquidos como el sodio, Pb-Si o Sn, gases como el CO₂ o partículas.

- **Sistema de conversión termoeléctrico:** es básicamente una máquina térmica, donde se produce la conversión de energía térmica en energía eléctrica. El ciclo de potencia más usado es el Ciclo Rankine compuesto por dos procesos isentrópicos y dos procesos isobáricos (Ilustración 3). El fluido de trabajo suele ser agua y vapor. El ciclo normalmente es cerrado y las temperaturas están limitadas por los materiales. En ocasiones el ciclo Stirling se ha usado en los discos parabólicos por su alto rendimiento, alta relación de concentración, modularidad y sobre todo porque no precisa de agua para su funcionamiento.
- **Sistema de almacenamiento térmico:** opcional. Almacena la energía para suplir los picos de demanda o proporcionar calor en períodos de nubes y claros o durante la noche.

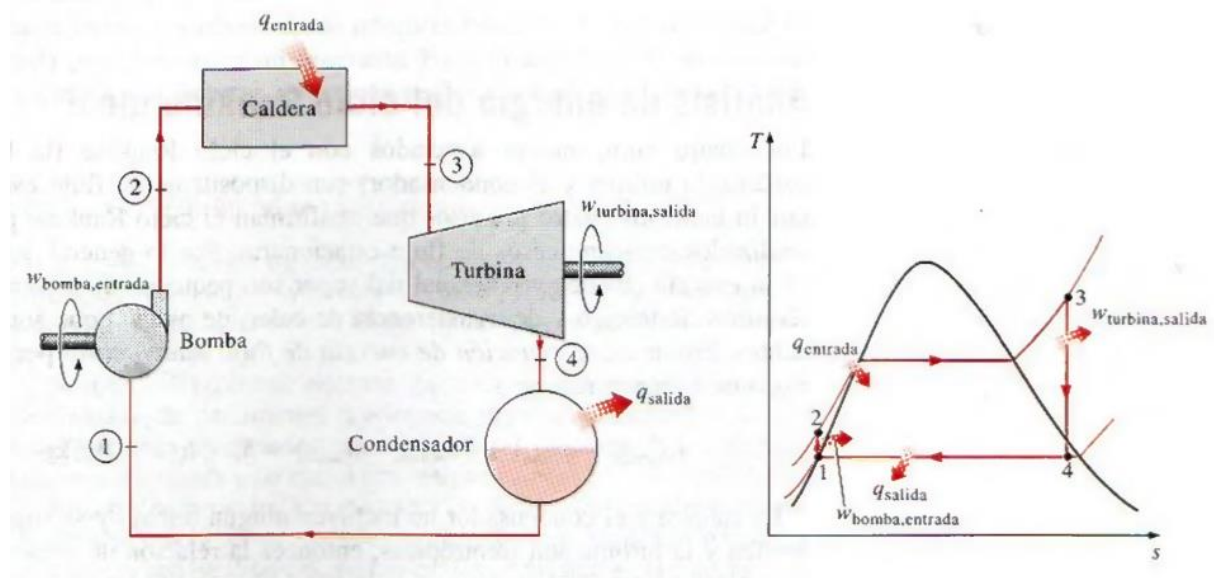


Ilustración 3 Ciclo Rankine

Fuente: Web

Las principales variantes tecnológicas son las que se muestran en la ilustración 4 y las que explico a continuación:

Colectores Cilindro
Parabólicos o CCP



Concentrador Lineal de
Fresnel



Sistema Receptor Central



Disco Parabólico



Ilustración 4 Variantes tecnológicas

Fuente: Elaboración propia

1.2.1 Sistemas de canal parabólico

La tecnología con mayor grado de madurez es la de cilindro parabólico, debido a que su tecnología está muy clara y desarrollada. Su funcionamiento se basa en seguir el movimiento del Sol con un captador, de un solo eje, para que los rayos incidan perpendicularmente en la superficie de captación. La radiación solar directa es reflejada por la superficie reflectante sobre un tubo absorbente colocado en la línea focal de la parábola, el cual transporta un fluido transmisor de calor que aumenta su temperatura. El fluido caliente se dirige hacia el circuito de potencia en el que se produce la transformación a energía eléctrica y su posterior distribución a los puntos de consumo pasando previamente por un centro de transformación.

Los principales elementos de los sistemas de canal parabólico son:

- **Reflector cilindro-parabólico:** refleja y concentra sobre el tubo absorbedor la radiación solar directa que incide sobre la superficie. Consiste en un espejo curvado de material reflectivo con forma de parábola.
- **Tubo receptor-absorbedor:** es la parte más importante de esta tecnología ya que el rendimiento global del colector depende en gran medida de este componente. Por él circula el fluido caloportador y es donde se produce la transformación de energía solar a energía térmica. Está formado por dos tubos concéntricos, el interior de acero

y el exterior de vidrio (para proteger y disminuir las pérdidas térmicas), separados por una capa de vacío. El fluido de trabajo que circula por el tubo interior depende de la temperatura máxima de operación, pudiendo ser agua desmineralizada o una mezcla con etileno-glicol si las temperaturas son bajas ($<200^{\circ}\text{C}$) o aceites sintéticos si las temperaturas son altas ($200^{\circ}\text{C} < T < 450^{\circ}\text{C}$).

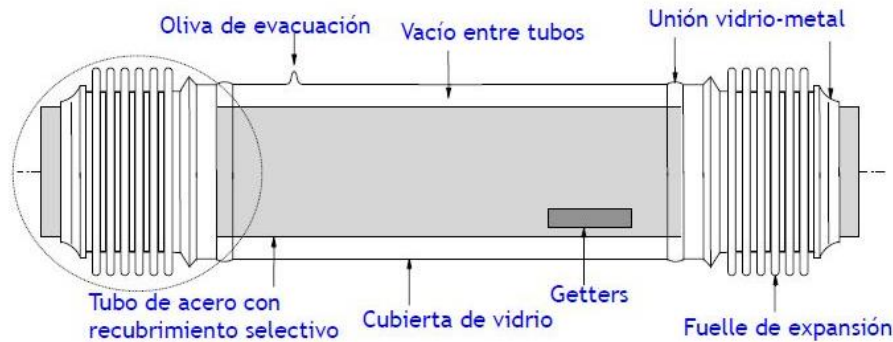


Ilustración 5 Tubo receptor

Fuente: Centrales Solares Manuel Silva

- **Sistema de seguimiento del sol:** conexiones o elementos de unión, en los que se producen la mayor parte de las averías, sobre todo en arranques y paradas. El sistema seguidor más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro-parabólicos del colector alrededor de un solo eje.
- **Estructura metálica:** proporciona soporte y rigidez al concentrador y a todos los componentes del sistema. Se suele usar hormigón armado para la cimentación de los captadores.

Un canal parabólico completo está formado por varios módulos unidos rígidamente en serie y movidos por un mismo mecanismo de seguimiento.

La tecnología de colectores cilindro-parabólicos puede incorporar almacenamiento para poder producir electricidad en horas de oscuridad. De ellas, la más extendida es el almacenamiento con sales. Esta tecnología se basa en la utilización de dos tanques de sales para almacenar el calor. Más adelante comentaré las características de este sistema de almacenamiento y las diferencias con el sistema de almacenamiento basado en vapor, objeto de este trabajo.

1.2.2 Sistema de receptor central

La segunda tecnología más desarrollada y la que le sigue a la anterior en implantación es la llamada de torre. La tecnología cilindro-parabólica está mucho más desarrollada que la de torre debido a

que hay muchos tipos de receptor central y la tecnología aún no está clara. Se consiguió un fuerte impulso gracias a la construcción de las plantas PS-10 y PS-20 en Sanlúcar la Mayor (Sevilla), sin embargo, aún se requiere un considerable esfuerzo en desarrollo para poder aprovechar el fuerte potencial de esta tecnología, capaz de producir temperaturas más elevadas que las de cilindro-parabólico y, gracias a ello, mayores rendimientos.

Los componentes que conforman un sistema de receptor central son:

- **Campo de helióstatos:** consiste en un conjunto de espejos orientados de tal manera que reflejen la luz solar en una dirección fija. Suelen ser espejos de vidrio-metal o membrana tensada que siguen el movimiento aparente del sol (como hacen los girasoles). Están constituidos por una superficie reflectante, una estructura con sus mecanismos y un sistema de control con el que puedes manipularlos. Los tamaños rondan de 1 m^2 a 150 m^2 , o muy pequeños o muy grandes, no hay tamaño intermedio. Existen distintas configuraciones del campo de helióstatos, entre las que se encuentran, campo circular o campo norte.
- **Sistema receptor:** recibe la radiación solar concentrada y la transforma en potencia térmica. Normalmente lo que se produce es el aumento de la entalpía de un fluido. El sistema receptor consta de una torre en la que en su extremo superior se encuentra el receptor (de cavidad, exterior, volumétrico o de lecho fluido), el absorbedor, una estructura soporte y elementos auxiliares como puede ser un calderín o el sistema de recirculación, entre otros. Los fluidos térmicos más comunes son agua/vapor, sales fundidas, aceites térmicos y aire. En este proyecto nos centraremos en el agua/vapor.
- **Sistema de almacenamiento:** es opcional. Se introduce para mejorar la gestionabilidad de la central Termosolar y para adaptar la central a la demanda eléctrica de la red. La selección del tipo de almacenamiento depende del tipo de demanda, de la cantidad de energía a almacenar y de la rapidez de respuesta.
- **Unidad de conversión de potencia:** es como una máquina térmica. Basado en un ciclo de potencia.
- **Sistema auxiliar:** la mayoría de las centrales Termosolares constan de un sistema de apoyo convencional cuya potencia instalada dependerá de las necesidades de potencia de cada planta. Este sistema auxiliar puede ser una caldera auxiliar que soporte aquellos picos de demanda que ni el generador de vapor, ni el sistema de almacenamiento puedan suplir.

Este Trabajo Fin de Grado se centrará en esta variante tecnológica debido a que el sistema de almacenamiento en cuestión lo poseen centrales de este tipo. Por ello cabe mencionar sus características principales que se presentan a continuación.

1.2.3 Discos parabólicos

La tercera tecnología más desarrollada es la de disco parabólico, que como la de torre, concentra la radiación en un punto. La radiación solar concentrada por el paraboloide incide sobre el receptor, donde se convierte en energía térmica que permite generar electricidad - trabajo mecánico - en el sistema generador.

Los elementos principales son:

- **Concentrador:** con forma de paraboloide de revolución. También llamado reflector. Puede consistir en un conjunto de reflectores.
- **Receptor:** absorbe la radiación reflejada por el concentrador y transfiere la energía absorbida al fluido de trabajo de la máquina térmica. Situado en el foco del paraboloide. Los tipos que se han usado hasta ahora son los receptores de tubos directamente iluminados y los receptores de reflujo.
- **Sistema de generación eléctrica:** es un sistema compacto. Un motor o turbina y alternador. Suele formar un solo bloque con el receptor, al que se llama unidad de conversión de potencia.
- **Estructura soporte y mecanismo de seguimiento**

Los discos parabólicos con motor Stirling no se están desarrollando debido a dos razones principales: el coste y el mantenimiento. En cuanto al coste del motor Stirling, éste ronda los 10000€ por KW instalado ya que se suelen construir artesanalmente y en cuanto al mantenimiento, que se suele hacer cada 3000 horas, hay que evitar fugas de hidrógeno y disponer de una instalación que reponga ese hidrógeno, esto implica un alto coste. Otro inconveniente de los discos con motor Stirling es que no existe solución de almacenamiento de energía térmica y tampoco existe un sistema fiable de integración. Hasta ahora es complicada la hibridación en un sistema de disco parabólico, aunque puede llegar a pensarse un pequeño depósito de sales fundidas o de sodio fundido. Con todo esto, se conseguirán avances tecnológicos cuando se salga de la fabricación artesanal y se llegue a la industrial.

Esta tecnología presenta un gran atractivo por su modularidad, alto rendimiento y por el hecho de no necesitar agua para la refrigeración.

1.2.4 Concentradores lineales de Fresnel

La última tecnología que apareció fue la de Fresnel. Es una alternativa de bajo coste al canal parabólico, pero experimenta una baja concentración y por consiguiente la temperatura máxima está limitada. También su rendimiento es inferior a las demás tecnologías. Su creador fue el italiano Giovanni Francia (también ideó los sistemas de receptor central) en 1964. De la misma forma que la de cilindro-parabólico concentran la radiación solar en una línea donde se encuentra el absorbedor.

El sistema está compuesto por largas filas paralelas de espejos de anchura relativamente pequeña que pueden girar alrededor de su eje longitudinal. Los espejos pueden ser planos o curvados y concentran la radiación solar en un receptor central fijo suspendido a una cierta altura sobre el plano de los espejos en la dirección del eje de rotación de los espejos.

Pueden tener dos o más receptores en paralelo, muy próximos entre sí, optimizando el aprovechamiento del terreno y minimizar los bloqueos entre filas de espejos.

El elemento principal del receptor es el tubo absorbedor, muy parecido al de CCP, aunque al alcanzar temperaturas inferiores (la relación de concentración es relativamente baja, del orden de 20), no precisa de un recubrimiento selectivo costoso, ni del tubo exterior de vidrio. Por el interior del tubo absorbedor circula agua/vapor.

Actualmente se encuentran en una fase de desarrollo inferior a las tecnologías anteriores pero por su simplicidad y bajo coste está experimentando un rápido desarrollo. Suele ser atractiva cuando el terreno es reducido.

1.3 Configuración general de una central termosolar

La configuración general de una central termosolar sin almacenamiento, definida como un sistema termosolar de concentración para generación de energía eléctrica, es la mostrada en la Ilustración 6. Y la configuración con almacenamiento e hibridación es la mostrada en la Ilustración 7. Al incluir el almacenamiento se vuelve un sistema más gestionable y competitivo frente a los sistemas tradicionales y por el hecho de tener una fuente de energía alternativa, como puede ser una caldera o un grupo electrógeno, la central aumenta su rendimiento global ya que evita que en aquellos periodos de tiempo en los que no disponemos de recurso solar la planta tenga que parar o trabajar a carga parcial.

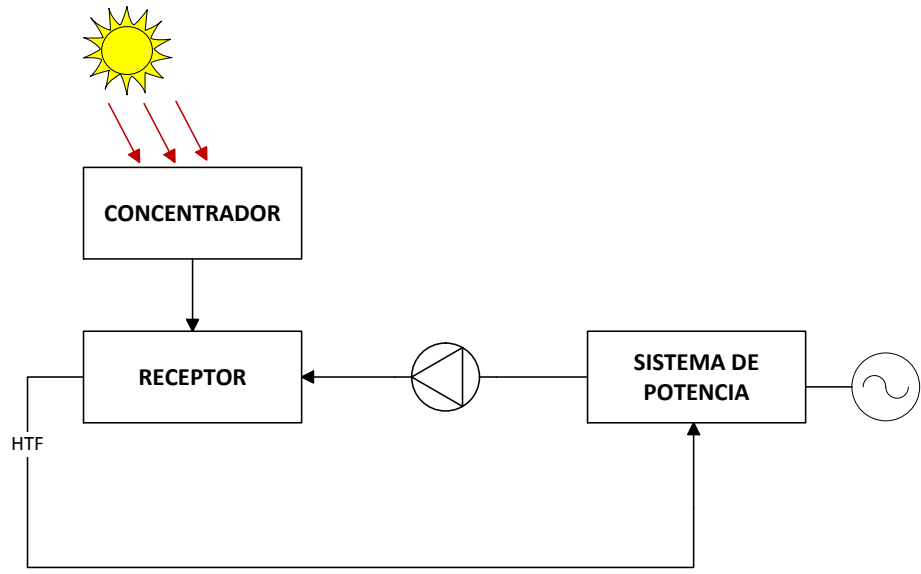


Ilustración 6 Configuración central Termosolar

Fuente: Elaboración propia

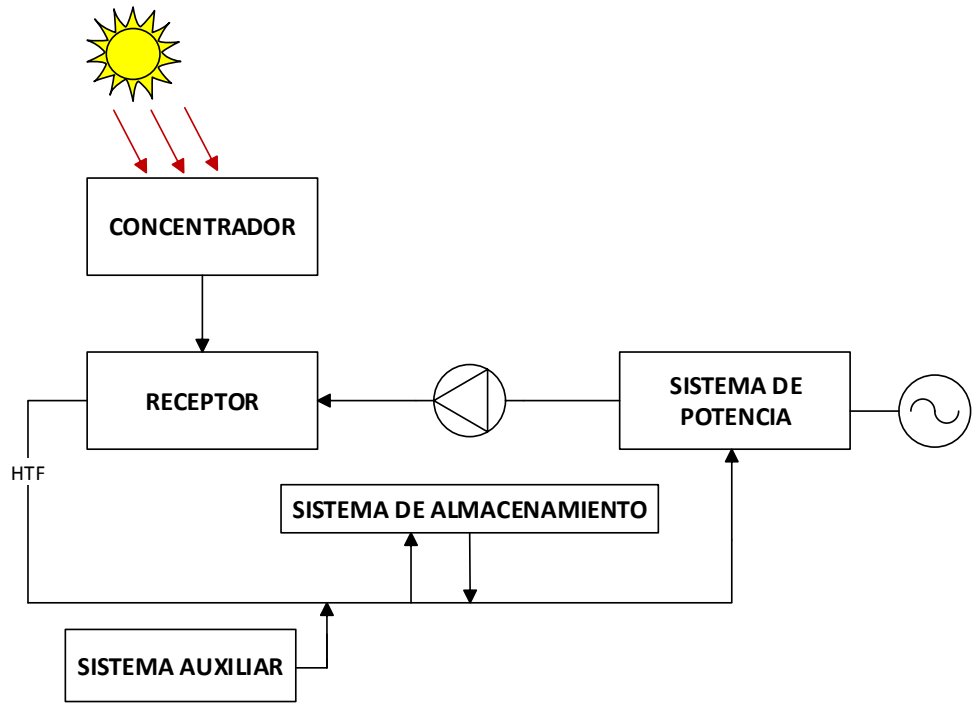


Ilustración 7 Configuración central Termosolar con almacenamiento y sistema auxiliar

Fuente: Elaboración propia

1.4 Ventajas y factores clave del almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía es un paso clave en el crecimiento y desarrollo de las energías renovables. Por ello cabe mencionar las ventajas de tener un sistema de almacenamiento frente a no tenerlo.

La necesidad de almacenamiento en una central solar surge de las tres premisas siguientes:

- Adaptación a la demanda
- Mejora de la gestionabilidad de la central termosolar o “dispatchability”
- Maximización de beneficios

El sistema de almacenamiento se instala en una Central Termosolar o en cualquier otro sistema porque la demanda no coincide con la generación. Hay pérdidas en el sistema de tuberías, en la generación de calor, en el bombeo, y además, en un sistema de energía solar, la curva de generación nunca se ajustará a la curva de demanda. Hay momentos en los que la demanda es superior a lo que está produciendo la planta y en el momento en que la planta intenta producir ese pico, vienen los problemas. No puedes someter a un generador a más carga de la que está diseñado ya que comienza a funcionar en puntos que no son los nominales sometiéndolo a tal carga que acaba reduciéndose su vida útil. En una industria suele haber un sistema de almacenamiento térmico como puede ser un acumulador de vapor para evitar esos picos de demanda no gestionables por la caldera de vapor. Por esto anterior, un sistema de almacenamiento se ve necesario para que el generador se adapte a la demanda. Por otro lado, se mejora la gestionabilidad de la central termosolar o en inglés, “dispatchability”, debido a que las instalaciones de concentración solar con almacenamiento tienen capacidad de almacenar el calor transferido por el sol durante el día para ser utilizado en su ausencia y continuar con la generación eléctrica limpia. Esto implica el funcionamiento continuo de la planta, es decir, 24 horas.

Debido al funcionamiento continuo de la instalación, se maximizan los beneficios. Podemos generar electricidad en momentos en los que antes no era posible. El sistema de almacenamiento puede dotar a la planta de una potencia extra para que ésta siga funcionando en periodos de nubes y claros o por la noche.

Además, los sistemas de almacenamiento de calor son de alta eficiencia ya que alcanzan eficiencias de 95 % a 99 %. También, dotan a la planta de mayor factor de capacidad, evitando el sobredimensionado del generador y el uso de sistemas auxiliares.

A la hora de introducir un sistema de almacenamiento en un proceso energético, hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Cantidad de energía almacenable por unidad de volumen medido en MJ/m^3 o kwh/m^3)
- Transmitancia en el proceso, tanto en carga como en descarga
- Toxicidad de la sustancia
- Coste del sistema

Cuando se dimensiona o diseña, habrá que tener en cuenta los factores que afectan a la capacidad de almacenamiento y los que inciden sobre el coste del mismo.

La capacidad de almacenamiento anteriormente dicha suele medirse en horas de funcionamiento de la planta a potencia nominal, no en términos de energía térmica almacenada, ya que de esta forma se estaría ignorando la dependencia de los niveles de temperatura en el almacenamiento.

2 ESTADO DEL ARTE. CENTRALES SOLARES CON SISTEMA DE ALMACENAMIENTO BASADO EN VAPOR

Existen en la actualidad numerosas plantas solares con sistemas de almacenamiento, ya que actualmente se puede considerar uno de los motores de este tipo de tecnología, pero únicamente existen tres plantas comerciales que poseen un sistema de almacenamiento basado en vapor.

Las plantas solares que constan de este tipo de almacenamiento son la PS-10, la PS-20, ambas en Sanlúcar la Mayor y la planta solar Khi Solar One en Sudáfrica. Las tres desarrolladas por Abengoa. A parte, se utiliza este sistema de almacenamiento de energía en plantas industriales convencionales desde hace bastantes años. Al final de este punto menciono una planta con este sistema de almacenamiento pero que está orientada primeramente a la investigación.

2.1 Planta solar 10

La planta solar 10 o PS10 es la primera planta de receptor central comercial del mundo, es decir, la primera con sistema de receptor central que produce electricidad bajo un enfoque puramente comercial. Con 11 MW de potencia, un campo solar de 60 hectáreas y 624 helióstatos de $120 m^2$ cada uno, consigue abastecer a 5.500 hogares, lo que equivale a la mitad de la población de un municipio español de Sevilla, en concreto, Sanlúcar la Mayor (Población total de 13000). El conjunto de los helióstatos da lugar a una superficie reflectante de unos $75000 m^2$. La planta se comenzó a construir en 2005 y entró en operación en 2007. Pertenece a la Plataforma Solúcar compuesta por nueve centrales Termosolares y fotovoltaicas. Es el mayor complejo europeo que concentra todas las tipologías solares existentes a escala comercial, con una potencia instalada de 180 MW, 30 de los cuales son obtenidos a partir de tecnología de torre (de la PS10 y PS20) y otros 150 procedentes de colectores cilindro-parabólicos (Solnova 1, Solnova 3 y Solnova 4).

El campo solar de la PS10 es diseño propio de Abengoa Solar pero es propiedad de Abengoa Yield, aunque Abengoa Solar se encarga de su operación y mantenimiento.



Ilustración 8 Receptor de la PS-10

Fuente: Google images

La configuración de los helióstatos es campo norte, es decir, el campo de helióstatos se encuentra situado a uno de los lados de la torre. Los helióstatos fueron fabricados y montados por Abener sobre una bancada circular que se sitúa en el centro del helióstato. Después de fabricarse se llevaron al campo y se colocaron sobre un pedestal metálico de 6 metros de altura.



Ilustración 9 PS10

Fuente: Abengoa Solar

El funcionamiento del sistema es como el explicado en la introducción. Los helióstatos concentran la radiación solar que reciben sobre el receptor de cavidad que se encuentra en lo alto de una torre

de 115 metros de altura. Por el receptor fluye agua a presión, obteniendo vapor saturado a unos 250°C y 40 bares de presión. Al ser vapor saturado se cuenta con un mejor control, debido a que se elimina la fase de sobrecalentamiento.

El receptor es de cavidad, en el que existen superficies refractarias que homogenizan el flujo solar y evitan altas temperaturas en superficies de absorción. En la ilustración 8 se ve una imagen del mismo. Fue diseñado y suministrado por Tecnical-Tecnicas Reunidas, una empresa contratista española que realiza proyectos industriales “llave en mano”. El receptor está compuesto por una serie de paneles de tubos que operan a muy alta temperatura y por los que circula agua a presión. Con este tipo de receptor, al estar los paneles del absorbedor dentro de una cavidad se consigue tanto reducir el efecto negativo de las inclemencias climatológicas como las pérdidas por radiación.

La planta cuenta con una turbina del fabricante Franco Tosi y con una potencia de 11 MW. Además, estuvo diseñada para generar 20 GWh/año eléctricos netos.

En la siguiente imagen podemos ver un balance energético de la planta realizado por Valeriano Hernández, sacado del libro “Tan lejos, tan cerca”:

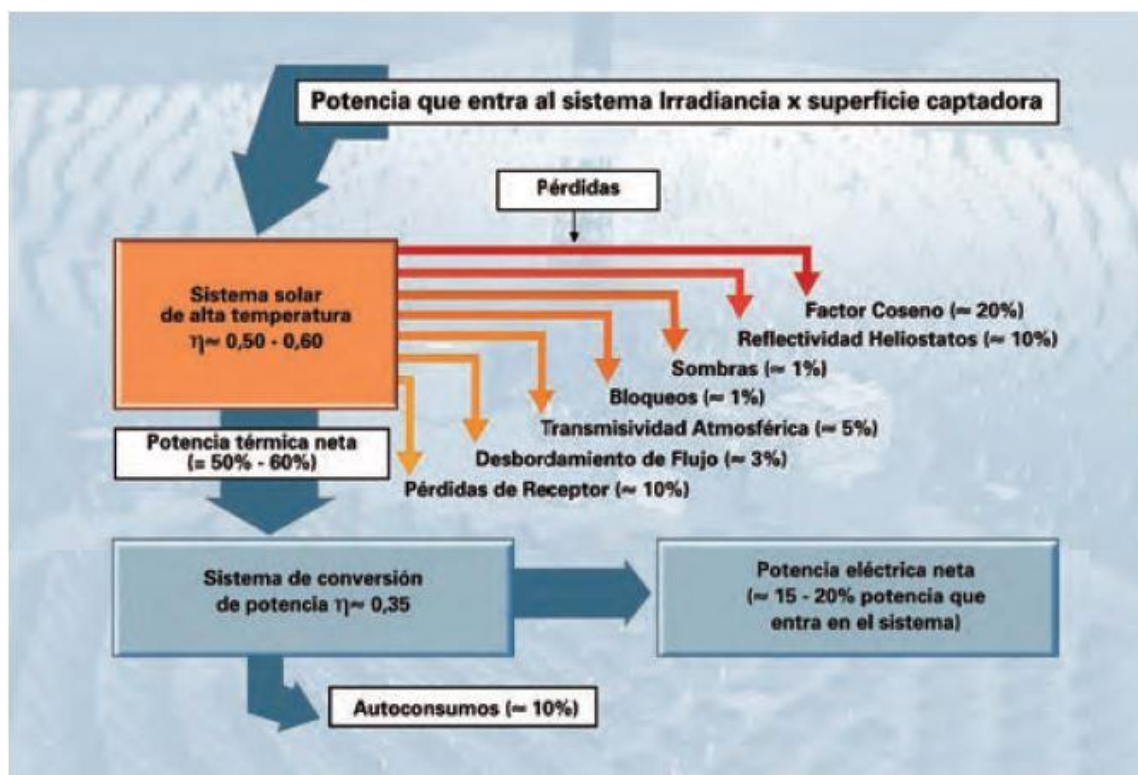


Ilustración 10 Balance energético de la PS-10

Fuente: Valeriano Hernández. “Tan lejos, tan cerca”

Lo destacable de esta planta solar es su sistema de almacenamiento, entre otras cosas, ya que es de las primeras, por no decir, la primera en España, en usar acumuladores de vapor para almacenar la energía.

El sistema de almacenamiento está formado por 4 acumuladores de vapor en serie que operan secuencialmente en función del estado de carga. Tienen una capacidad aproximada de 12 MWh (térmicos). Con ellos se consigue suministrar 11 MWe durante 50 minutos cuando la turbina opera al 50 % de carga. Esto permite a la planta seguir operando durante cortos periodos de nubes y claros.

El rendimiento medio del sistema de almacenamiento es del 92,4 %.

La función principal del sistema de almacenamiento es aportar el vapor necesario para el funcionamiento de la turbina en condiciones especiales de operación, como períodos transitorios sin sol, en las que el vapor procedente del receptor solar es insuficiente para mantener la turbina en funcionamiento.



Ilustración 11 Acumuladores de vapor de la PS10

Fuente: Final Technical Progress Report PS10

Para cubrir periodos de carencia solar, la planta cuenta con una caldera auxiliar de gas natural para generación de vapor, con capacidad del 15 % de la producción total de la planta.

Como dato interesante, un hecho relevante de esta planta fue que en los primeros días de explotación comercial se operó por encima del 100 % de la eficiencia esperada en generación solar

respecto a los modelos teóricos que se habían hecho, según un boletín informativo de abril de 2008 de Abengoa.

El día 10 de febrero del 2008 se analizó durante 4 horas la producción de la planta. Fue un día bastante despejado con pocos intervalos nublados. Se comparó la producción teórica y la real y se apreció un aumento de la producción esperada. La producción esperada se estimaba en unos 1,7 millones de kWh y se alcanzaron 2,3 millones de kWh, es decir, un 32,7 % de aumento en ese periodo.

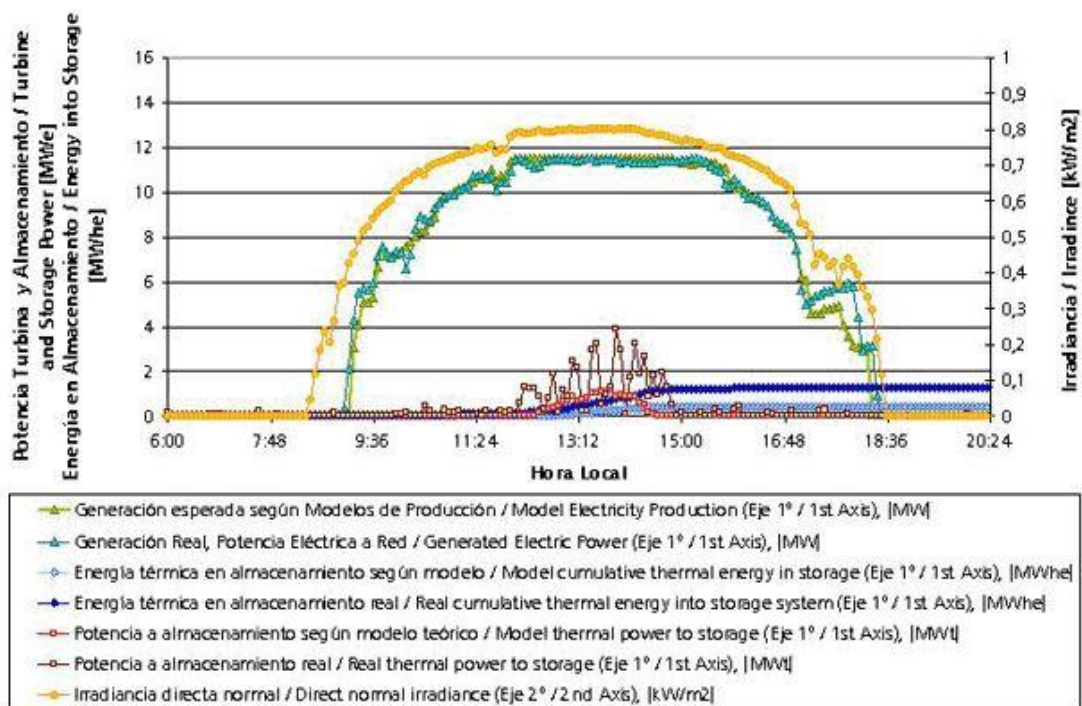


Ilustración 12 Análisis producción PS10 10-02-08

Fuente: Boletines de Abengoa

2.2 Planta solar 20

La PS20 es otra de las plantas que integra la Plataforma Solúcar. En 2009 se comienza a construir, también en Sanlúcar la Mayor (Sevilla). Con 20 MW de potencia, el doble que su predecesora (PS10), PS20 incorpora avances tecnológicos muy importantes.

Las mejoras que incluye esta planta solar frente a la anterior son:

- Receptor más eficiente.
- Mejoras en los sistemas de control y operación.
- Mejoras en el sistema de almacenamiento térmico.

Estos avances se consiguieron gracias a la experiencia acumulada, que permitió un salto cualitativo en las tecnologías de torre. La planta estuvo tres días en período de pruebas de producción y funcionamiento, en los que se superó la producción de electricidad teórica de diseño, que ayudó a concluir la construcción de la misma. Teniendo en cuenta el aumento de la potencia y el campo solar, los helióstatos cuentan con una mejora del sistema de control ya que aquellos que se encuentran más alejados de la torre precisan de una precisión más afinada que los que se encuentran más cercanos, además de un tratamiento especial de los espejos para conseguir el radio de curvatura adecuado.



Ilustración 14 PS20

*Fuente: Informe anual 2008
Abengoa Solar*

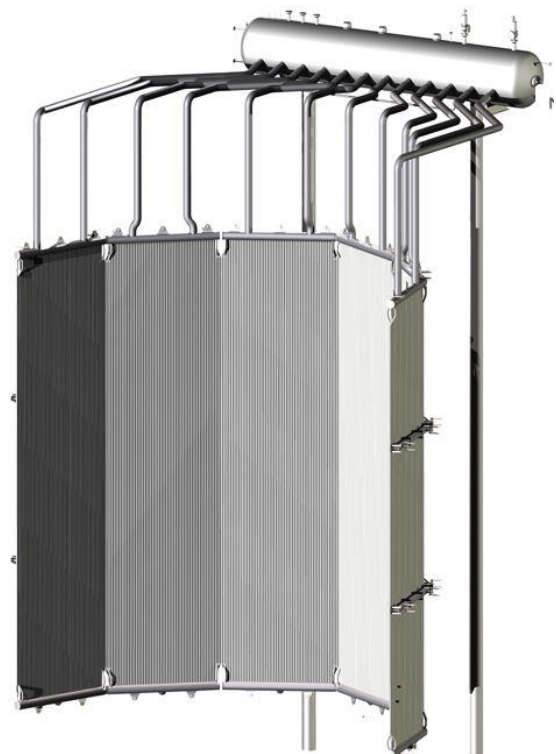


Ilustración 13 Receptor solar PS20

Fuente: Aalborg

PS20 está formada por un campo solar que consta de 1255 helióstatos, de $120 m^2$ cada uno, diseñados por Abengoa Solar. Los helióstatos son los mismos que los de la PS10 y su configuración es en hileras, hasta un total de 45, dando lugar a un campo norte. En la imagen 14 podemos ver la configuración del campo de helióstatos. El receptor con geometría de cavidad y recirculación natural, se encuentra situado en lo alto de una torre de 165 metros de altura (unos 50 metros más alta que PS10), en el que los helióstatos reflejan la radiación solar que permite la

producción de vapor necesaria para generar electricidad a través de la turbina. El receptor fue diseñado y suministrado por Aalborg CSP, una empresa líder mundial en generadores de vapor para plantas de energía solar concentrada. La turbina de doble carcasa es del fabricante italiano Franco Tosi Meccanica, en cuya gama de productos podemos encontrar turbinas de vapor industriales y para generación de electricidad de hasta 850 MW, turbinas hidráulicas de hasta 400 MW y equipos de intercambio de calor. Como curiosidad, las válvulas son de los fabricantes Schubert & Salzer, Leser, ambos alemanes, y de Saidi que es español, el condensador se encargó al fabricante alemán GEA y las bombas son de Sulzer, un fabricante suizo.

El tipo de caldera es de panel receptor, como aparece en la ilustración 14. La presión de diseño es de 50 barg y posee una capacidad de 150 T/h de vapor saturado. Todos estos datos se han obtenido de la página web de Aalborg CSP, su fabricante.

A continuación incluyo un esquema de la posible configuración del sistema de bombeo de una planta solar de torre obtenido de la página web de Sulzer. Puede que este sea la configuración del sistema de bombeo de esta planta por ser Sulzer el que proporcionó esta parte del sistema.

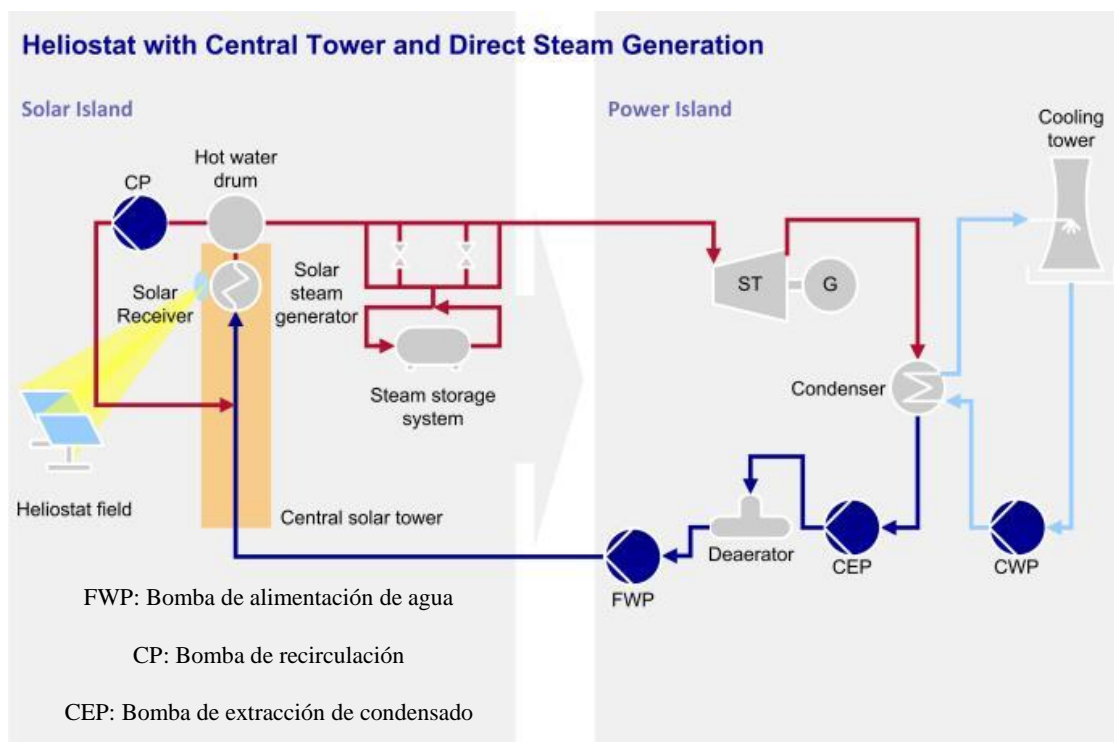


Ilustración 15 Torre central de heliostatos y generación directa de vapor (DSG)

Fuente: Sulzer

Según fuentes, la planta PS20 produjo y produce energía limpia suficiente para el suministro de 10.000 hogares evitando 12.000 toneladas de CO2.

A su vez, el campo solar es de mayor tamaño que su predecesora y lleva consigo una mejora en el diseño. Con un mejor diseño del receptor y un mayor aprovechamiento de la radiación solar incidente se buscaba una disminución sustancial de los autoconsumos de la planta, para así aumentar la potencia neta.

En la siguiente imagen se encuentran los distintos tipos de válvulas que proporcionó la empresa Saidi a Abengoa para la planta PS20. En ella podemos ver las características técnicas de cada tipo de válvula.

HOJA DE PROYECTO			
PLANTA TERMOSOLAR PS20 SANLUCAR LA MAYOR			GREEN ENERGIES
Ciente final	Abengoa	Ingeniería	-
Localización	Sevilla	Fecha	2008
			Alcance: 1.000 uds
TIPO DE VALVULA	RATING	DIAMETRO	MATERIALES
Compuerta Globo Retención	150 a 1500 LBS	1/2" - 24"	WCB, CF8M, A105 y 316L
Bola	150/300LBS y 1000WOG	1/2"-6"	WCC, CF8M
Mariposa	PN10 y 150LBS	2"-24"	GGG40 y ASTM A395
Seguridad	-	-	-
Otras	-	-	-
Notas	Válvulas manuales y con reductor manual tipo cónico		
Instrumentación	-	Sellado	Juntas Klinger*

Ilustración 16 Válvulas PS20.

Fuente: Saidi

La planta cuenta con un sistema de almacenamiento basado en vapor formado por dos acumuladores de vapor que permite mantener la turbina en funcionamiento en períodos de baja irradiación solar. Además, consta de una caldera auxiliar, que sirve de apoyo al sistema de almacenamiento térmico, y que según la legislación vigente puede quemar entre un 12% y un 15% de gas natural. La caldera auxiliar permite regular el funcionamiento del acumulador y también actúa en los arranques y paradas de la planta.

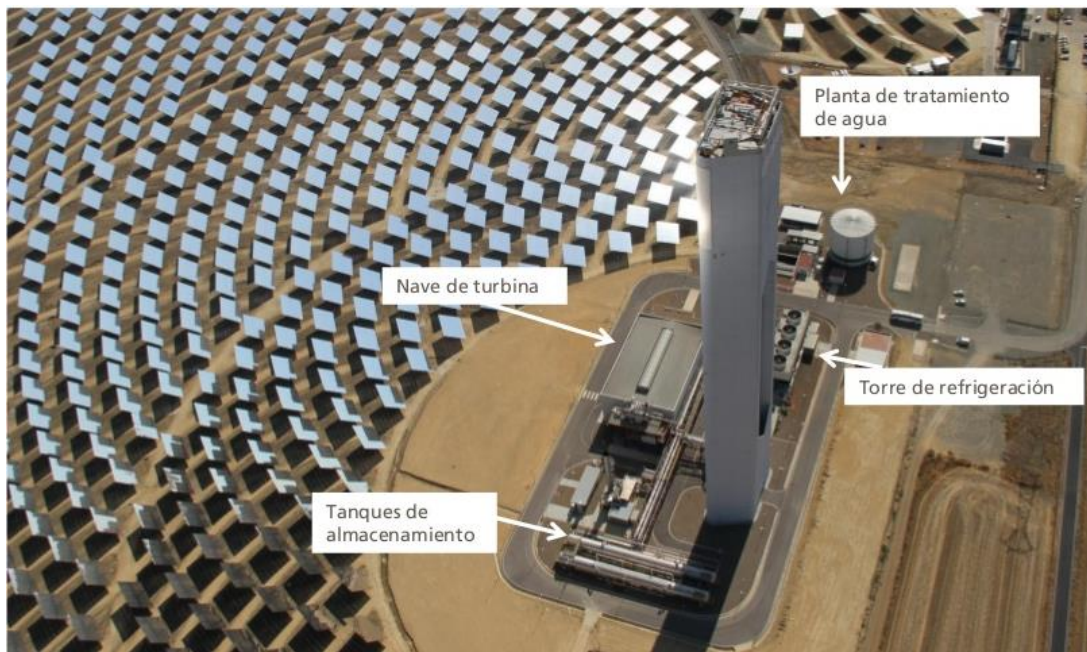


Ilustración 17 Vista del sistema de almacenamiento de la PS20

Fuente: Web

La energía generada en la planta, después de transformarla a la tensión de red, se inyecta en la misma mediante una subestación que comparte con PS10.

Aun habiendo mejorado el diseño de la planta, se presentan las dificultades del control de los helióstatos, ya que puede ocurrir que varios de ellos se desenfocan y generen puntos calientes, dando lugar a daños en el receptor por el alcance de altas temperaturas. A esto se le suma la limpieza de los helióstatos, que a medida que aumenta el ensuciamiento se reduce la eficiencia considerablemente.

La planta está diseñada para producir energía en exceso a partir de cierta hora de la mañana. El excedente se lleva a los acumuladores para que en las horas de irradiación insuficiente se siga generando electricidad.

2.3 Khi Solar One

Primera planta de torre central que se ha construido fuera de España y en África. Se consideró un avance en esta tecnología y puede considerarse un hito de la termosolar. Fue desarrollada por Abengoa e Industrial Development Corporation de Sudáfrica (IDC). Comenzó su operación comercial en febrero de 2016 y es la primera planta de torre en conseguir 24 horas de operación únicamente con energía solar, gracias a su sistema de almacenamiento.

Posee una capacidad de 50 MW con los que consigue abastecer de energía limpia aproximadamente a 45000 hogares sudafricanos.

La torre con generación directa de vapor maximiza la eficiencia de este tipo de sistemas solares por tener como fluido caloportador vapor sobrecalentado. Es la primera central de torre en usar vapor sobrecalentado. La planta se encuentra en Sudáfrica, cerca de la ciudad de Upington en Northern Cape Province. El rendimiento del ciclo de vapor es superior a las anteriores ya que la máxima temperatura de funcionamiento que alcanza el vapor es de 530 °C por ser sobrecalentado.

La planta consta de los siguientes elementos principales:

- **Campo de helióstatos:** el campo solar está formado por 4120 helióstatos modelo ASUP 14, de 140 m² cada uno, que reflejan la luz del sol dirigiéndola hacia el receptor solar mediante un mecanismo seguidor que se programa y controla de manera remota. Ocupan una superficie de 300 hectáreas.



Ilustración 18 Helióstato de Khi Solar One

Fuente: Web

- **Receptor solar:** formado por tres cavidades, dos que generan vapor saturado (evaporadores), una orientada al este y otra al oeste, y la tercera orientada al sur (sobrecalentador) para producir vapor sobrecalentado hasta las condiciones de entrada a la turbina. Los receptores están formados por paneles de tubos por los que circula el

agua y el vapor de agua. Fabricado por la empresa de Bélgica CMI Solar. El vapor saturado se almacena a 130 bares en los acumuladores que luego puede estar acondicionado a demanda a una presión inferior, con el fin de producir electricidad, incluso por la noche. En la siguiente tabla muestro datos obtenidos del fabricante:

MWth	t/h	Bar a	° C
250	235	120	530
	105	130	Saturado

Tabla 1 Datos del receptor de Khi Solar One

Fuente: CMI Solar

- **Torre solar:** torre circular de hormigón de 192 metros de altura y 37 de diámetro. Más alta que la de la PS10 (115 metros) y de la PS20 (165 metros). En la parte más alta se encuentra el receptor y al pie de la misma el aerocondensador de vapor. La torre ejerce también la función de chimenea para lograr el flujo de aire necesario para que funcione el aerocondensador.



Ilustración 19 Receptor y torre Khi Solar One

Fuente: Google Images

- **Turbina de vapor:** de un solo cuerpo y 50 MW de potencia. Consta de tres extracciones intermedias para precalentamientos que mejoran el rendimiento de la misma. Le llegan 235 t/h de vapor sobrecalentado a 530 °C y 120 bar. Puede funcionar en un régimen de mínima potencia de 6 MW.
- **Sistema de almacenamiento térmico:** compuesto por 19 acumuladores de vapor y un intercambiador de calor para generar vapor sobrecalentado. El vapor sobrecalentado se genera a partir del intercambio de calor latente entre el vapor saturado acumulado con otro vapor saturado a mayor presión. Permiten la operación de la planta sin necesidad de radiación durante 2 horas. Los acumuladores son del fabricante alemán Dillinger. El modelo es SA 533 Type B Class 2, con un espesor entre 12 – 107 mm, ancho de 2450 mm y largo 12350 mm. Para su construcción se utilizaron 2600 toneladas de acero de baja aleación. Cada acumulador tiene un peso de 260 toneladas.



Ilustración 20 Sistema de almacenamiento Khi Solar One

Fuente: Google Images

- **Caldera auxiliar:** permite el funcionamiento normal de la planta cuando no es suficiente la producción de la misma.
- **Sistema de refrigeración seca:** instalado por SPX Corporation. Constituido por un condensador natural que emplea torres para distribuir el aire a través de láminas estabilizadoras a fin de disipar el calor. Este tipo de refrigeración sustituye el empleo de ventiladores como ocurre normalmente en los condensadores enfriados por aire y además ofrece una eficiencia superior y menos costes iniciales en comparación con

otras tecnologías naturales en seco que emplean enfriamiento indirecto. Al funcionar estas torres de enfriamiento sin ventiladores, no se precisa de gran cantidad de energía eléctrica. Según cálculos de Abengoa, la tecnología permite a Khi Solar One emplear un 80 % menos de agua que una planta termosolar con enfriamiento húmedo.

A parte, hay otros elementos secundarios pero también imprescindibles en una planta de este tipo como es una planta de tratamiento de aguas, para producir a partir de agua bruta el agua de los distintos efluentes de la planta y para verter el agua de desecho si existiese, una planta de aire de servicios e instrumentos que proporciona aire comprimido, un sistema de muestreo para controlar en todo momento la calidad del vapor en puntos estratégicos de la planta, un sistema de dosificación química para evitar la corrosión del agua, posibles depósitos de sólidos y para regular el PH, además de un sistema contra incendios y un sistema de ventilación y aire acondicionado por las condiciones ambientales y la necesidad de refrigeración de los equipos.

La planta se conecta a la red de distribución eléctrica que se encuentra a 10 km de la planta para verter la energía producida a 132 kV. Por lo que posee una subestación eléctrica que transforma la tensión de generación de la planta en la tensión de vertido a la red eléctrica (de 15 kV a 132 kV).

En la ilustración 21 se puede observar un esquema de esta planta, en el que podemos ver el campo solar, la torre donde se encuentra el receptor, el circuito de potencia constituido por el generador (receptor), el condensador, la turbina y el sobrecalentador. A parte se encuentra el sistema auxiliar de potencia y el sistema de almacenamiento basado en acumuladores de vapor.

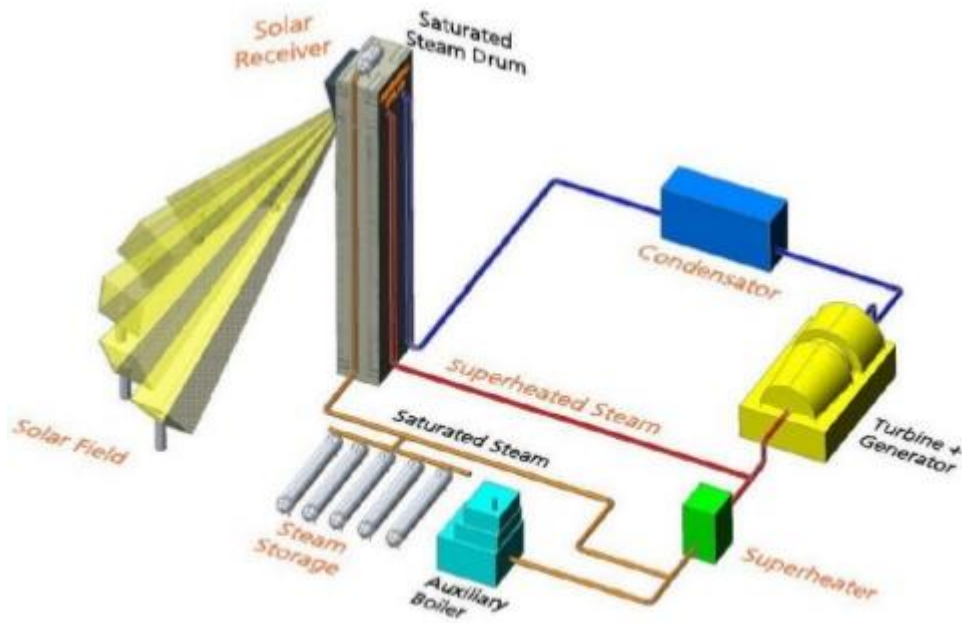


Ilustración 21 Khi Solar One

Fuente: Web

2.4 Yanking Solar

Yanking Solar thermal power, es una planta principalmente orientada a la investigación, de 1 MW de potencia con un sistema de almacenamiento de vapor saturado y aceite de una hora.

Está situada en Yanqing, Beijing (China) y se encuentra operativa desde Agosto del año 2012.

Genera 1,95 GWh al año. El campo solar está formado por 100 helióstatos de 100 m^2 cada uno del fabricante Himin Solar que conforman los 10.000 m^2 de superficie reflectante. El receptor central pertenece a la Universidad Xian Jiatong y el fluido de trabajo es agua, que entra al receptor a 104 °C y sale a 400 °C . El receptor se encuentra en lo alto de una torre de 120 metros de altura.

El ciclo de potencia se basa en el ciclo de vapor Rankine y por él circula vapor saturado y aceite. La turbina es de la empresa Hangzhou y el enfriamiento es húmedo. El rendimiento de transformación solar-electricidad es de 13.7 %.



Ilustración 22 Planta solar Yanking (Beijing)

Fuente: Protrenders

3 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA. ACUMULADOR DE VAPOR

Desde hace muchos años se usan sistemas de almacenamiento de energía y a día de hoy podemos elegir entre una amplia variedad de formas de almacenamiento. Según el tipo de energía almacenada, podemos hablar de sistemas de almacenamiento químico, eléctrico, térmico, electro-mecánico y mecánico.

3.1 Breve introducción de los sistemas de almacenamiento de energía en centrales solares

Hay tres formas de almacenar la energía en una central termosolar:

1. **Almacenamiento sensible:** se basa en el cambio de temperatura del medio de almacenamiento. Puede describirse con la siguiente ecuación:

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Donde, Q es la energía almacenada, m es la masa del medio de almacenamiento, C_p es el calor específico del material y ΔT es el cambio de temperatura durante el proceso. La mayoría de los sistemas de almacenamiento a escala comercial de plantas solares son de este tipo. Lo que más abunda es el almacenamiento indirecto en dos tanques de sales fundidas.

2. **Almacenamiento latente:** se basa en el cambio de fase del medio de almacenamiento entre un rango de temperaturas cuyos límites vienen determinados por el campo solar. Las transiciones de fase pueden ser del tipo sólido-sólido, líquido-vapor y sólido-líquido, aunque la más usada es la última debido a la poca expansión volumétrica que conlleva en comparación a la transición líquido-vapor y un alto calor latente frente a la transición sólido-sólido. La cantidad de energía almacenada sigue la siguiente fórmula:

$$Q = m * (C_{ps} * (T_f - T_s) + h + C_{pl} * (T_l - T_f))$$

Donde C_{ps} y C_{pl} son los calores específicos medios en las fases sólidas y líquidas respectivamente, h es la entalpía de cambio de fase, T_f es la temperatura de fusión, T_l es la temperatura del líquido y T_s es la temperatura del sólido.

Este proceso es casi isoterma lo que puede llevar consigo una pequeña mejora de la cantidad de energía almacenada respecto al almacenamiento sensible en el mismo rango de temperaturas.

3. **Almacenamiento químico:** es el menos investigado y desarrollado a día de hoy, sin embargo, al ser el que más calor libera al producirse la reacción es el que presenta mayor potencial.

Este tipo de almacenamiento depende fundamentalmente del calor procedente del campo solar para desarrollar reacciones químicas reversibles, por lo que el medio de almacenamiento ha de poseer la habilidad de disociarse completamente en el rango de temperaturas del campo solar. En el período de carga se producen reacciones endotérmicas mientras que en el proceso de descarga se obtienen reacciones exotérmicas. La cantidad de energía almacenada depende del calor liberado en la reacción y del grado de conversión, dado por:

$$Q = a_r * m * \Delta h$$

Donde a_r es la fracción reaccionada y Δh es el calor de reacción por unidad de masa, siendo m la masa del medio de almacenamiento. Una de las principales ventajas del almacenamiento químico es que los productos químicos tras la reacción de disociación pueden almacenarse a temperatura ambiente reduciendo considerablemente las pérdidas térmicas. Pero cuenta con una serie de impedimentos como son las limitaciones en la transferencia de calor, la inestabilidad cíclica, problemas de reversibilidad en las reacciones y el elevado coste.

Otra vía para diferenciar los sistemas de almacenamiento es según la forma en la que se transfiere el calor al medio de almacenamiento. Podemos distinguir entre sistemas activos y pasivos. En un sistema activo el intercambio se realiza por convección forzada y el medio de almacenamiento circula por el intercambiador de calor o por el acumulador de vapor, en cambio, en un sistema pasivo, el fluido de transferencia pasa a través del medio de almacenamiento que generalmente se encuentra en estado sólido. Que se encuentre en estado sólido es su punto débil.

Todos los sistemas solares de concentración térmica pueden disponer de un sistema de almacenamiento, aunque para los discos parabólicos con motor Stirling se requieren diseños muy distintos a los otros tres sistemas. A continuación enumero los tipos de sistemas de almacenamiento más usados en función de la tecnología:

- Sistemas cilindro-parabólico:
 - Dos tanques indirectos de sales fundidas: $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
 - Dos tanques directos de sales fundidas: $\Delta T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$
 - Dos tanques directos – fluido de trabajo

- Lecho de rocas
- Sistemas de receptor central:
 - Dos tanques directos de sales fundidas: $\Delta T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - Vapor saturado: acumulador de vapor
 - Vapor saturado-aceite
 - Bloque de grafito
- Sistema lineal de Fresnel: almacenamiento a corto plazo con vapor presurizado (<10 min)
 - Tanque Ruth: ilustración 23
 - Tambor de vapor

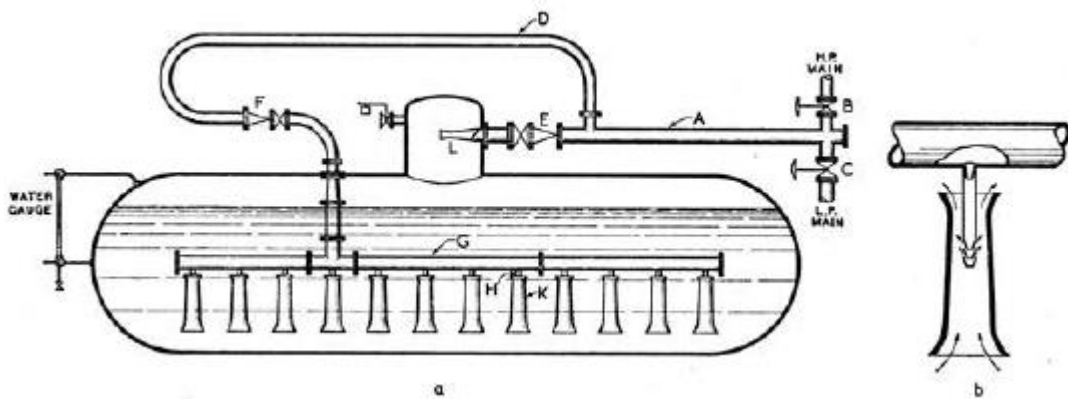


Ilustración 23 Tanque Ruth

Fuente: The efficient use of steam

3.2 Concepto de múltiplo solar

Es importante conocer el significado de múltiplo solar, ya que de él dependerá si es conveniente instalar un sistema de almacenamiento o no.

El múltiplo solar es la relación entre la potencia térmica producida en el receptor, en el punto de diseño, y la potencia térmica demandada por el ciclo. Es decir, representa el sobredimensionado de una instalación (en este caso del campo de heliostatos) respecto al punto de funcionamiento nominal. Así, un múltiplo solar igual a la unidad significa que la central ha sido diseñada para proporcionar la potencia nominal en el punto de diseño. Valores superiores a uno implica un excedente de energía en el punto de diseño. Este exceso de energía, permite hacer uso del sistema de almacenamiento. Por lo que para poder almacenar, interesa un múltiplo solar superior a uno.

Al incluir almacenamiento, aumenta la operación de la turbina en condiciones nominales. A la hora de diseñar la planta y teniendo en cuenta que a mayor múltiplo solar, mayor sistema de almacenamiento, habrá que llegar a un equilibrio entre coste y beneficio de la planta.

La gestionabilidad de la instalación es un factor crucial en los sistemas solares. A mayor múltiplo solar, y por lo tanto gestionabilidad, mayor será la dependencia entre la generación de energía eléctrica y la disponibilidad del recurso solar.

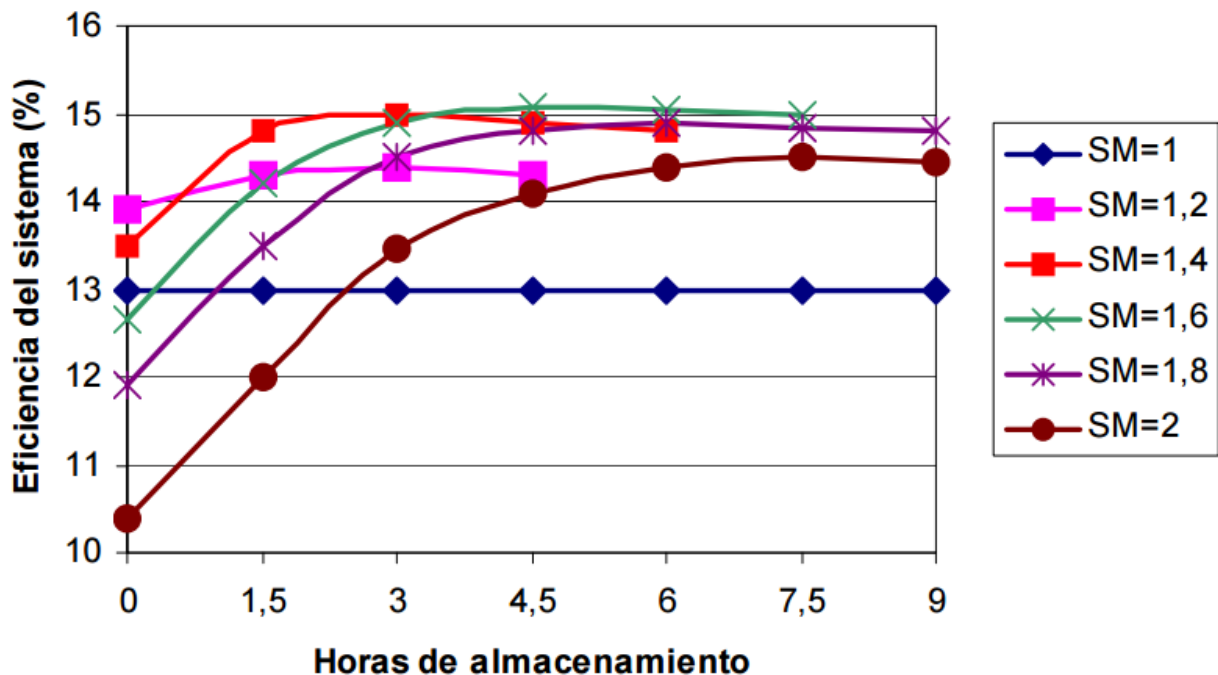


Ilustración 24 Eficiencia en función del MS y las horas de almacenamiento

Fuente: C. J. Winter, R.L. Sizmann, L.L. Vant-Hull. "Solar Power Plants. Fundamentals, Technology, Systems, Economics". Springer-Verlag

3.3 Acumulador de vapor

Nos centraremos en el sistema de almacenamiento con vapor, el cual se basa en lo que es un acumulador de vapor. Este sistema puede considerarse como una reliquia de la "era del vapor" con pequeñas aplicaciones en la industria moderna. En la actualidad hay numerosas industrias que utilizan este equipo para hacer frente a los picos de demanda o para aumentar la energía disponible de la instalación. El acumulador de vapor suministra vapor a la instalación cuando la demanda de la instalación es mayor que el caudal nominal de vapor suministrado por el generador y acumula la energía del vapor cuando disminuye la demanda.

Un acumulador de vapor es un depósito lleno parcialmente de agua. En el recipiente, tras el proceso de carga, hay una masa de agua y de vapor en equilibrio, ambos a la misma presión. El depósito suele ser cilíndrico y puede encontrarse en posición vertical u horizontal, normalmente horizontal, dependiendo del espacio del que se disponga o de la mezcla que se quiera conseguir entre el agua y el vapor. Se acumula el vapor en agua ya que la acumulación en vapor supondría un mayor volumen de almacenamiento.



Ilustración 25 Acumuladores de vapor de la PS10

Fuente: Solúcar R&D

Este sistema no tendría sentido en una central de sales, ni con aceite térmico ya que interesa cuando el fluido de trabajo es agua/vapor para contar con las ventajas del vapor como HTF. Es un sistema viable para pocas horas de almacenamiento. Como he comentado antes en el estado del arte, podemos fijarnos que los tiempos de almacenamiento no son tan altos como en un sistema de sales fundidas, en los que se puede alcanzar hasta 15 horas de almacenamiento. Actualmente, en la planta solar del desierto de Atacama de Abengoa se alcanzan 17,5 horas de almacenamiento y en la planta Solana, en Arizona (Estados Unidos), se alcanzan 6 horas de almacenamiento, ambas con sistema de almacenamiento de sales fundidas. Normalmente, con el acumulador de vapor contamos con 1 o 2 horas de almacenamiento como mucho.

Antes de seguir explicando este sistema, es importante saber las razones por las que se decide dotar a la planta solar de un sistema de almacenamiento, las cuales coinciden en gran medida con las que tiene una instalación de generación de vapor tradicional en la industria. Entre las razones se encuentran la necesidad de hacer frente a las cargas puntas que provocan la disminución de la presión del generador, su parada por una falsa alarma del indicador de nivel y en todo caso una producción de vapor húmedo y contaminado. De esta forma aumenta el mantenimiento necesario del generador y se reduce su vida útil y su rendimiento. Con el acumulador de vapor se evita tener

que sobredimensionar el generador de vapor, ya que si se sobredimensiona, disminuye el rendimiento del conjunto por el funcionamiento en puntos que no son de diseño.

Para mejorar el funcionamiento del generador y de la planta solar en general en los periodos de cargas puntas, existen otros métodos como el aislamiento de las partes no esenciales de la instalación con válvulas reguladoras de presión en el colector de distribución de vapor o en la línea de distribución principal, o reorganizando los consumos de vapor (si es que los hay) en los puntos de consumo que no son críticos.

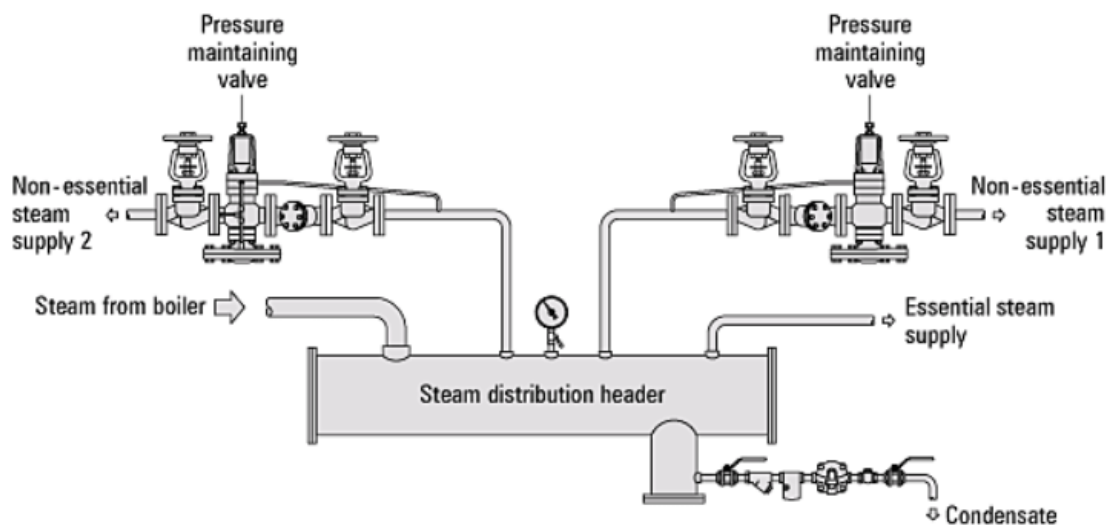


Ilustración 26 Válvulas reguladoras de presión

Fuente: Centrales Solares de Javier Pino

En

la práctica, hay dos caminos para generar vapor en el acumulador de vapor:

- a) Añadiendo calor al agua en ebullición, indirectamente mediante un tubo de combustión y un quemador, como en una caldera convencional.
- b) Reduciendo la presión del agua almacenada a la temperatura de saturación. Esto da lugar a un exceso de energía en el agua con la que una porción de agua se convierte en vapor.

El fenómeno ocurrido en el segundo camino se conoce como “flashing” y es el que se produce en el acumulador de vapor. En principio hay dos tipos de sistemas para almacenar vapor; el acumulador de presión variable y el acumulador de presión constante. Nos centraremos en el de presión variable.

Los fenómenos que se producen en los procesos de carga y descarga del acumulador son los siguientes:

- **Proceso de carga:** cuando hay baja demanda, el exceso de vapor del generador se introduce en el acumulador por debajo del nivel de agua. Es decir, el vapor sobrante se lleva al acumulador. El vapor condensa y el agua aumenta su temperatura. Como consecuencia, la presión del depósito aumenta. El vapor se almacena saturado y proviene directamente del calderín. En este proceso la válvula de entrada introduce una pérdida de carga.
- **Proceso de descarga:** cuando el generador no produce lo suficiente como para satisfacer la demanda, sobre todo en los periodos de demanda punta, baja la presión del acumulador. Parte del agua contenida se revaporiza y baja su temperatura. Cuando se alcanza en el acumulador la presión mínima necesaria, el acumulador se ha descargado totalmente. Este proceso se realiza mediante una válvula que fija la presión de salida, con la correspondiente pérdida de carga asociada.

Es conveniente que no se descargue al 100% el depósito ya que se almacenaría únicamente vapor y se saturaría el depósito, dando lugar a periodos transitorios. Por ello, si el dimensionamiento es el adecuado, nunca se descarga completamente.

El nivel del agua aumenta durante la carga y disminuye durante la descarga del acumulador, ya que se inyecta vapor saturado. Cuando el nivel alcanza un máximo, actúa un purgador colocado en el nivel correspondiente descargando las pequeñas cantidades que sobrepasen ese nivel al sistema de retorno de condensador. Normalmente, se descarga una ligera mayor cantidad de vapor que la que entra al acumulador.

En cuanto al funcionamiento, el vapor entra en el acumulador por una tubería de distribución a través de unos inyectores situados por debajo del nivel máximo de agua. Los inyectores favorecen la mezcla del vapor y del agua y deben garantizar una distribución homogénea del vapor en el interior del acumulador. Para ello, los inyectores se disponen con un determinado ángulo de inclinación en diferentes direcciones para que el vapor no incida directamente sobre las paredes del depósito sino sobre el mayor volumen de agua y así homogeneizar la distribución de vapor. Dentro del acumulador, el agua y el vapor se encuentran en equilibrio térmico, a la temperatura de ebullición (100 ° C) y a la presión del depósito.

La masa de vapor descargada por los inyectores depende de la diferencia de presión entre el vapor y el agua y varía durante el período de carga.

3.4 Periodo de carga/descarga del acumulador de vapor

El acumulador necesita estar completamente cargado al principio del periodo de descarga para operar correctamente. Para que esto se produzca, debe cumplirse principalmente lo siguiente:

1. Suficiente tiempo entre el final del proceso de carga y el siguiente, para recargar el agua que se encuentra acumulada en el depósito.
2. La demanda media de vapor ha de ser inferior que la producción máxima continua del generador, para que esa capacidad de más se use para recargar el agua almacenada en el acumulador durante los periodos de menor demanda.

Otro criterio que asegura la suficiente capacidad del acumulador y que debe cumplirse en el diseño es:

- Debe haber suficiente agua almacenada para producir el vapor flash requerido en la descarga. Se cumple si el volumen del acumulador es el adecuado y suficiente.
- Altos valores de liberación de vapor producirán vapor húmedo. La velocidad a la que se libera el vapor del agua y la cantidad liberada debe estar bajo un valor predeterminado. Se satisface si la superficie de agua es lo suficientemente grande, lo que equivale a un buen tamaño del acumulador.
- Suficiente capacidad de evaporación. Esto depende de la presión a la que se encuentra el agua cuando se ha llenado el acumulador (a la presión del receptor) y de la presión mínima a la que operará el acumulador en la descarga (la presión de diseño del acumulador). Cuanto mayor es la diferencia entre estas dos presiones, mayor vapor se producirá.
- La presión de diseño del acumulador ha de ser superior a la presión de distribución aguas abajo. Esto es necesario para que haya un diferencial de presión a través de la válvula de reducción de presión (PRV), para proporcionar el flujo requerido del acumulador a la planta. Cuanto menor sea la diferencia entre la presión de distribución y del acumulador, menor será el acumulador pero al ser el diferencial de presión a través de la válvula reductora menor, el tamaño de la válvula se incrementará de tal forma que pueda hacer frente a la mayor demanda cuando el acumulador está a la presión de diseño, también definida como la mínima presión al final del periodo de descarga.

Las presiones de almacenamiento obligan a trabajar con depósitos de volumen reducido.

3.5 Elementos del sistema

Para proteger el acumulador de vapor y velar por su buen funcionamiento, existen una serie de elementos que se encargan de ello. En la ilustración 27 podemos ver, por ejemplo, la válvula de corte (stop valve), que se encarga de cerrar el paso del vapor cuando hay sobrepresiones u otras anomalías en esa línea de distribución. Inmediatamente después, hay una válvula de control (check or non-return valve) que permite el flujo en una dirección pero no lo permite en la dirección opuesta, es decir, hacia el generador de vapor. Puede ocurrir que el generador se bloquee o detenga su funcionamiento y provoque la circulación de vapor en sentido contrario.

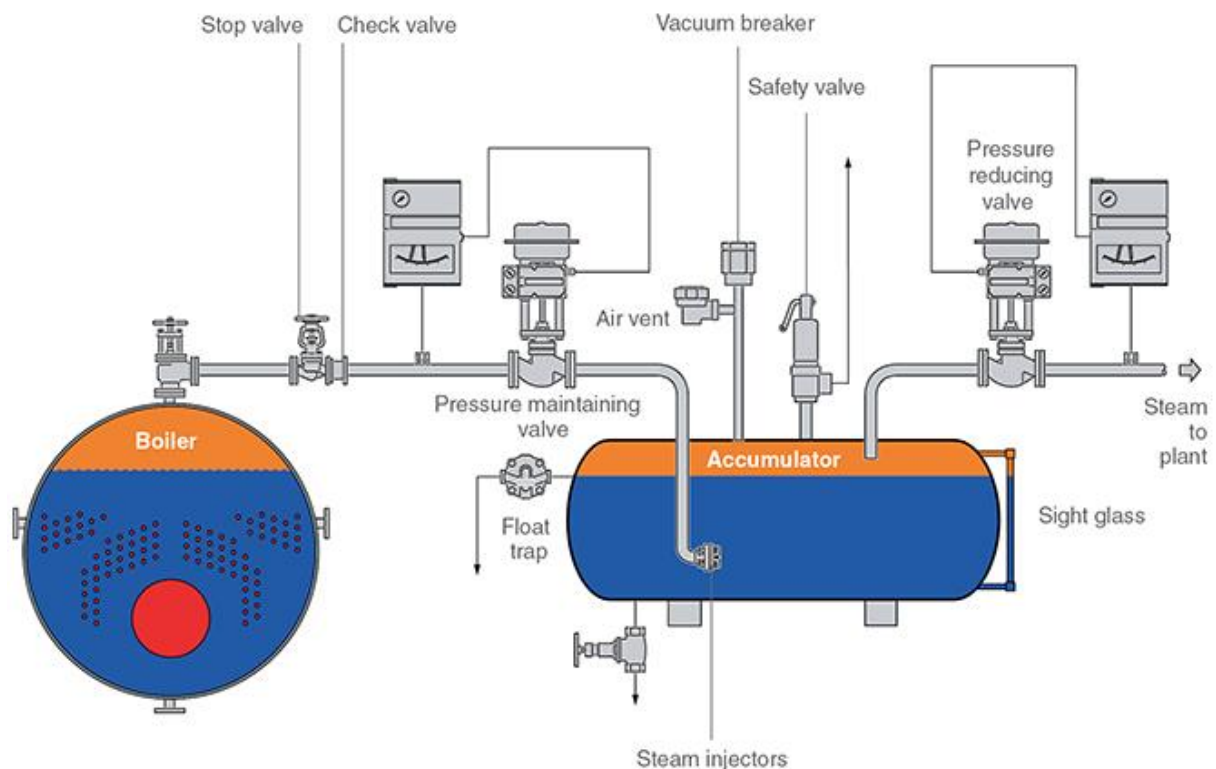


Ilustración 27. Elementos de un acumulador de vapor

Fuente: Spirax Sarco

A continuación indico y comento la funcionalidad de cada componente, mostrada su ubicación en la imagen anterior:

3.5.1 Válvula de interrupción y válvula antirretorno

La válvula de interrupción o “stop valve” sirve para evitar cualquier tipo de fuga en la línea de distribución determinada. A continuación de la misma, hay una válvula antirretorno para evitar el flujo de vapor del acumulador al generador si este deja de funcionar por algún motivo. Una buena opción para este tipo de instalación sería una válvula de retención de disco.

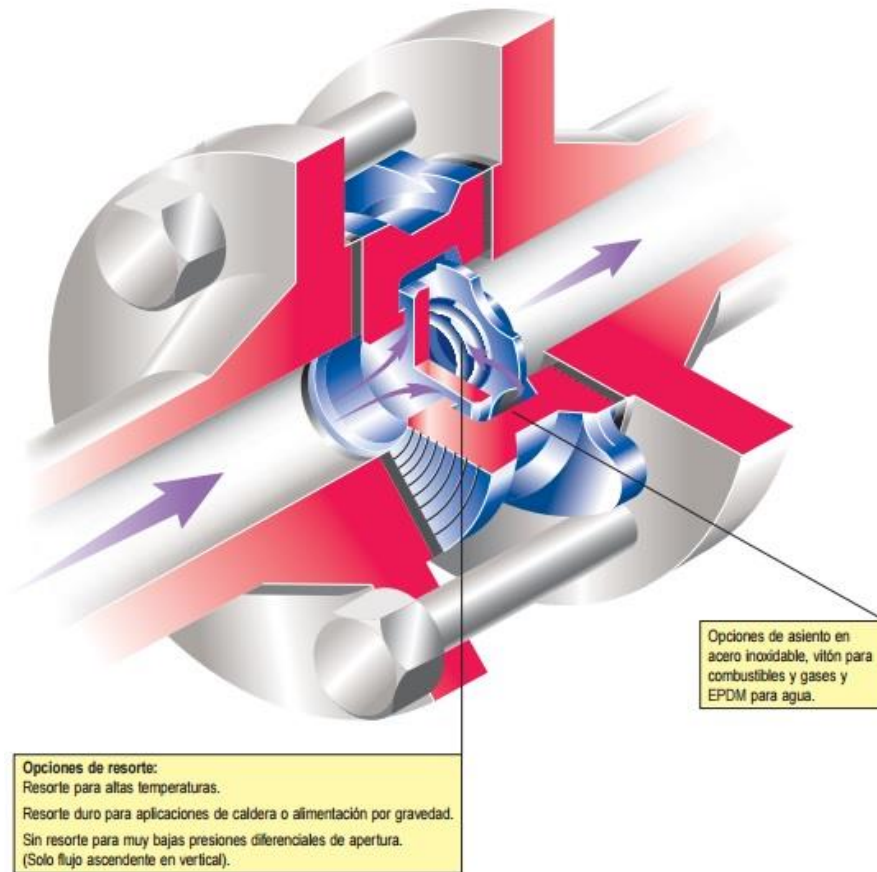


Ilustración 28 Válvula de retención de disco

Fuente: Spirax Sarco

Las válvulas de retención DCV abren por la presión del fluido y cierran por resorte así que cesa el flujo antes de que se produzca el flujo inverso, siguiendo el funcionamiento que se muestra en la ilustración 29.

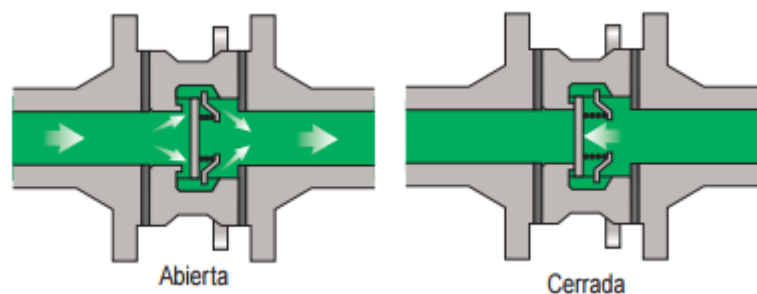


Ilustración 29 Apertura y cierre de la válvula de retención de disco

Fuente: Spirax Sarco

3.5.2 Válvulas de mantenimiento de presión

Esenciales para los procesos de carga y descarga del acumulador de vapor, en inglés también son conocidas como “surplussing valves” o “spill valves”. Son esenciales para asegurar que el ritmo al que fluye el vapor del generador al acumulador es conforme a la capacidad del generador de vapor (receptor) y para ello deben estar perfectamente sincronizadas. Controla tanto los incrementos de presión como los decrementos de presión que se puedan producir en la línea de distribución correspondiente.

3.5.3 Purgador de aire y rompedor de vacío

Para que el drenaje sea más efectivo y evitar la formación de vacío en el acumulador durante su descarga, se utilizan el purgador de aire y rompedor de vacío. Previamente, antes de la formación de vapor durante la descarga, el espacio para el vapor está lleno de aire. Este aire no posee ningún valor calorífico y de hecho afectará al rendimiento de la planta. Puede dar lugar a la corrosión en el sistema de condensado. Por ello, debe purgarse junto a otros gases que se puedan acumular en el depósito.

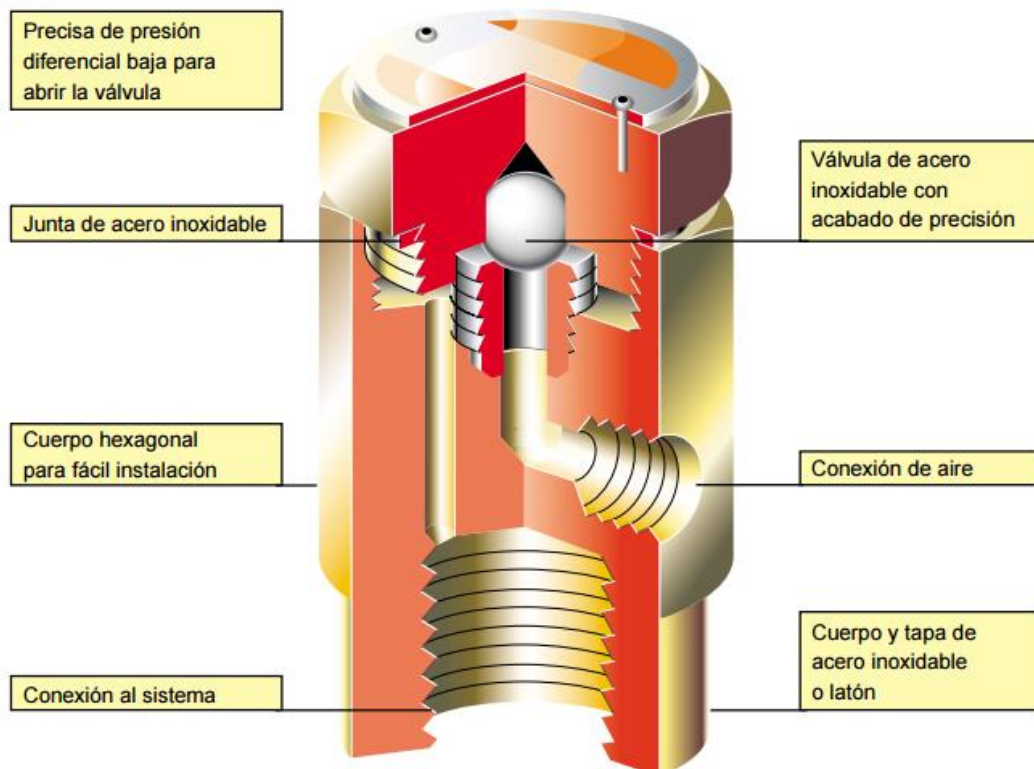


Ilustración 30 Rompedor de vacío

Fuente: Spirax Sarco

El funcionamiento del rompedor de vacío es el siguiente:

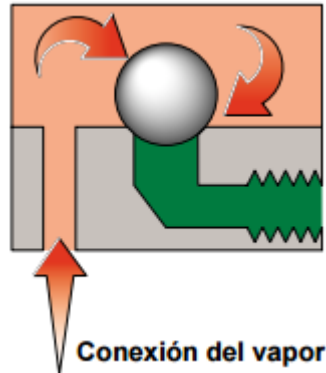


Ilustración 31 Funcionamiento normal

La válvula de acero inoxidable con acabado de precisión está firmemente apoyada en el asiento durante las condiciones normales de operación asegurando el cierre total.

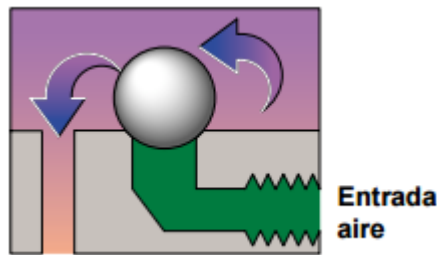


Ilustración 32 Enfriamiento

Durante el enfriamiento, el vapor condensa y por consiguiente se reduce la presión. La válvula permanece en el asiento hasta que la presión en la cámara cae por debajo de la presión de entrada del aire (normalmente la presión atmosférica).

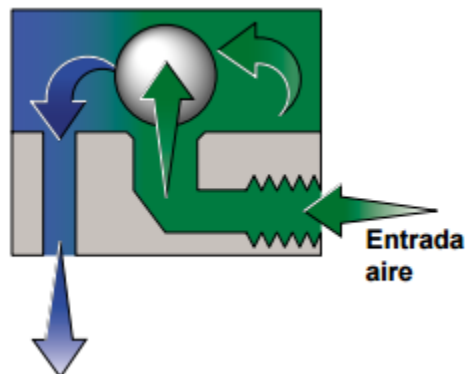


Ilustración 33 En el punto de vacío

En el punto de vacío, la válvula instantáneamente se levantará del asiento. El aire entrará a través de la cámara superior evitando la formación de vacío.

Los que se usan normalmente son los de latón roscado o de acero inoxidable austenítico roscado.

3.5.4 Válvula de seguridad

En la ilustración 27 se encuentra en la parte superior del acumulador. Una válvula de seguridad protege contra excesos de presión que se pueden producir en el acumulador y es estrictamente necesaria cuando la presión de generación de vapor es superior a la presión de funcionamiento máxima del acumulador de vapor. Sin embargo, hay que tener en cuenta a la hora de tomar una decisión los escenarios que se piensan poco probables pero que pueden poner en peligro la instalación. Como puede ser un fuego en la misma. En este caso, si el acumulador estuviese totalmente cargado y todas las entradas y salidas cerradas, la presión en el acumulador podría aumentar. Habría que tomar medidas de seguridad teniendo en cuenta las posibles situaciones peligrosas.

Las válvulas de seguridad protegen al personal, planta y beneficio de la empresa. Una característica crítica de cualquier válvula de seguridad es la calidad del cierre hermético, que se puede comprobar con los requisitos de la norma API 527 de la American Petrochemical Institute.

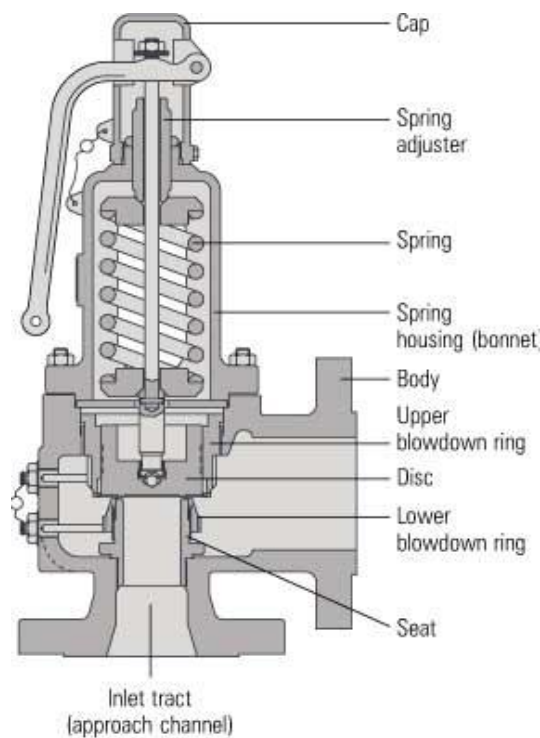


Ilustración 34. Válvula de seguridad ASME

Fuente: Spirax Sarco

A la hora de dotar el sistema de válvula de seguridad es conveniente tener en cuenta lo siguiente:

- La válvula de seguridad se debe instalar siempre con la línea central del alojamiento del resorte en vertical en la parte superior de la válvula.
- No debería haber válvula de interrupción en la entrada o salida de la válvula de seguridad.
- El diámetro nominal de la tubería de salida debería ser igual o mayor que la salida de la válvula.
- La válvula no deberá soportar ningún tipo de esfuerzo que pueda causar deformación o fugas.
- En las tuberías de salidas ascendentes, se debe proveer de una purga de pequeño diámetro en el punto donde se pueda acumular más agua, y un drenaje conectado en el tapón de drenaje de la válvula.
- La tubería de descarga deberá estar dimensionada de tal manera que la contrapresión desarrollada no sea superior al 12 % de la presión de tara.

Como en todas las instalaciones de válvulas de seguridad, la descarga deberá ser a un área segura y a través de tuberías de venteo con un tamaño adecuado (ilustración 35).

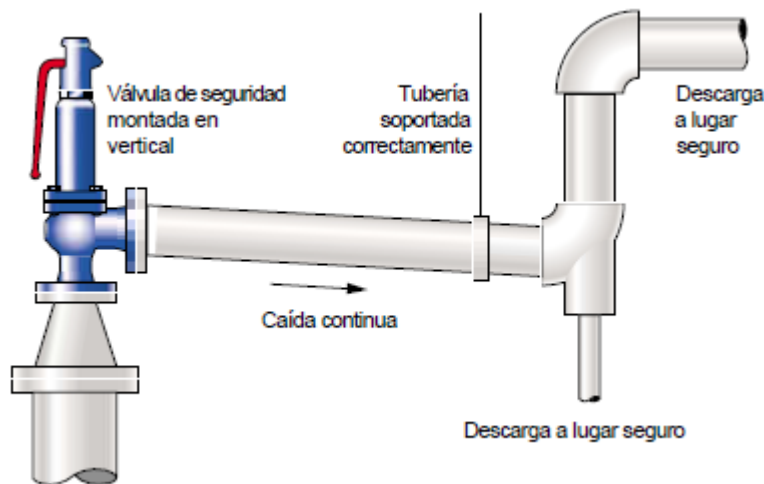


Ilustración 35 Instalación válvula de seguridad

Fuente: Spirax Sarco

3.5.5 Drenaje

Situado en la parte baja del acumulador. Es una válvula que permite el desagüe del depósito para operaciones de mantenimiento e inspección.

3.5.6 Purgador para controlar el nivel máximo

El depósito no debe estar lleno completamente de agua, por lo que se instalan purgadores en el nivel correspondiente para controlar el nivel de agua. Se instala una trampa de tipo flotante junto con el purgador para que no se supere ese nivel. Cuando el nivel del agua cae, es decir, cuando se forma el vapor, la trampa cerrará automáticamente para evitar el escape de vapor.

Los tipos de purgadores existentes son:

- **Termostáticos:** basados en la diferencia de temperatura entre el vapor y el condensado. El condensado ha de enfriarse por debajo de la temperatura del vapor antes de ser eliminado. A su vez, los purgadores termostáticos se clasifican según el tipo de elemento sensible a la temperatura. Distinguiéndose los de presión equilibrada, expansión líquida, y el último grupo, de expansión metálica.
- **Mecánicos:** utilizan la diferencia de densidad entre el vapor y el condensado. El movimiento de una boya o una cubeta actúa sobre la válvula. Dentro de los purgadores mecánicos encontramos los de flotador y los de cubeta.
- **Termodinámicos:** utilizan la diferencia de velocidad entre el vapor y el condensado. Un disco abre la válvula con la baja velocidad del condensado y cierra con la alta velocidad.
- **Mixtos:** utilizan un procedimiento no incluido en los grupos anteriores y se diferencian los purgadores de impulso y los de laberinto.

A la hora de seleccionar el purgador, hay que tener en cuenta las condiciones en las que va a trabajar y las características de cada tipo de purgador.

En este caso, al trabajar con vapor saturado podríamos seleccionar cualquier tipología y si tenemos en cuenta que el agua se encuentra a la temperatura de saturación, no sería conveniente utilizar los purgadores termostáticos.

3.5.7 Estación reductora de presión a la salida

Necesaria para la carga y descarga del acumulador. Así se controla el caudal de vapor y se asegura un caudal constante. Con esto se consigue no superar la presión de diseño del acumulador. Este tipo de válvulas notan y controlan las bajadas de presión. En cambio, las válvulas de

mantenimiento de presión, explicadas anteriormente, notan las subidas de presión en el acumulador.

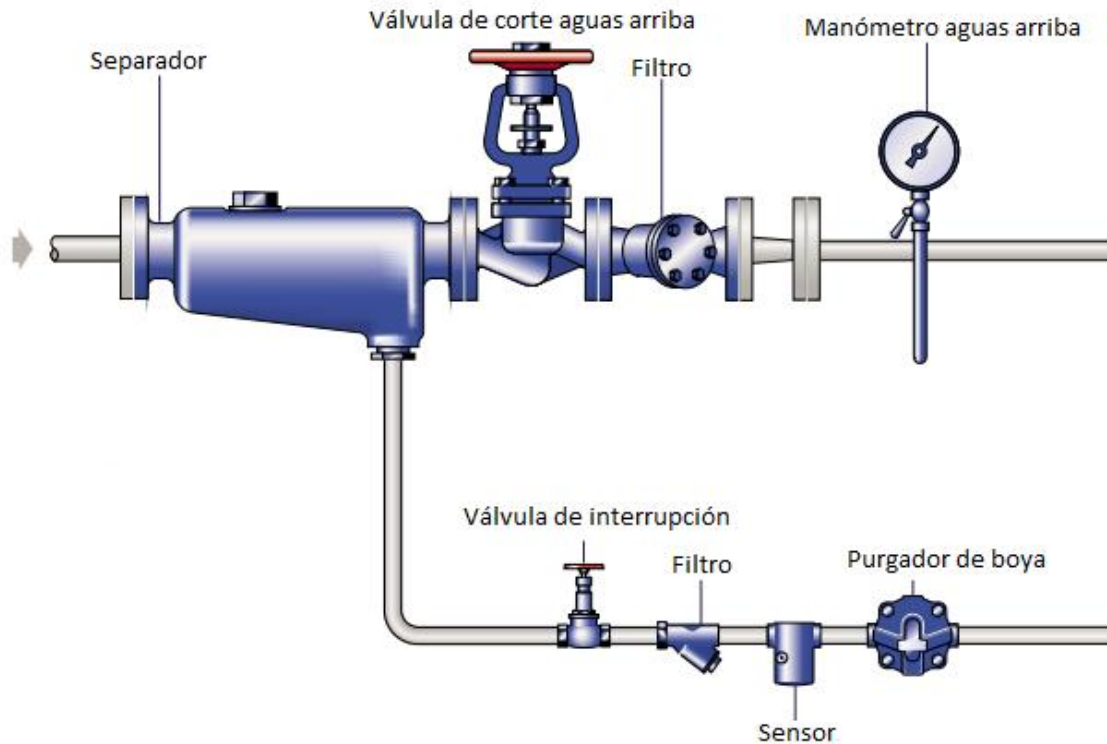


Ilustración 36 Estación reductora de presión general

Fuente: Spirax Sarco

Una estación reductora de presión general (ilustración 36) consta de los siguientes elementos:

- Separador: elimina las partículas de agua arrastradas por el vapor eliminando la erosión, corrosión y los golpes de ariete. Garantiza la vida útil y rendimiento de la planta.
- Válvula de corte aguas arriba: permite la parada de la estación y se sitúa a continuación del separador para que se acumule el condensado en la línea de suministro durante la parada. Maximiza la seguridad en la puesta en marcha y el mínimo tiempo de parada.
- Filtro: atrapan la suciedad antes de que pueda entrar en la válvula reductora de presión. Garantiza el rendimiento fiable de la válvula reductora de presión y los equipos aguas abajo.
- Manómetro aguas arriba: para monitorear la presión de suministro y evitar problemas en el suministro de vapor.
- Válvula de interrupción: en caso de mantenimiento del purgador, permite su aislamiento.

- Sensor: para controlar en todo momento al purgador.
- Purgador de boya: elimina el condensado en cuanto se forma.

Estos elementos se encontrarían antes de la válvula reductora (ilustración 37) y a continuación de la válvula reductora habría una válvula de corte aguas abajo y una válvula de seguridad.

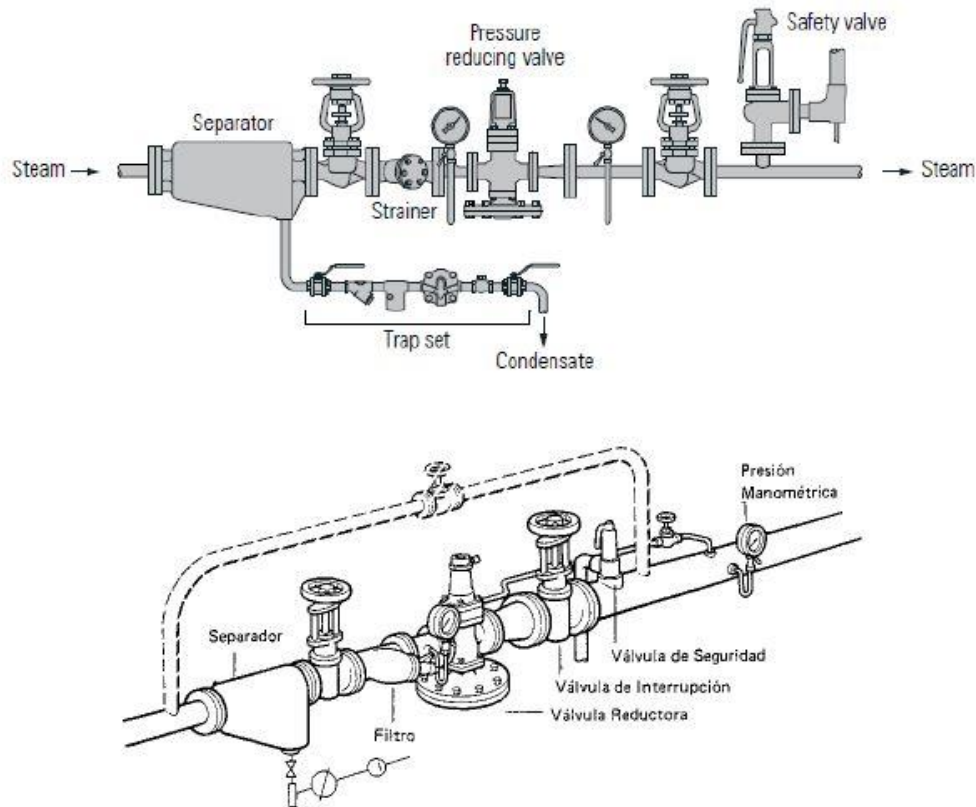


Ilustración 37 Grupo reductor de presión

Fuente: Spirax Sarco

Con la válvula reductora se consigue una reducción de presión de la mejor manera posible. Esta reducción de presión hace que se forme el vapor saturado en el interior del acumulador. Por ley, justo después de la válvula reductora tiene que haber una válvula de seguridad para asegurar que la presión aguas debajo de la válvula reductora nunca supere la presión máxima permisible de los equipos aguas abajo. También la instalación cuenta con un manómetro aguas abajo para monitorizar la presión al final de la estación reductora.

Hay varios tipos de válvulas reductoras de presión dependiendo de las condiciones del sistema. Si las cargas son pequeñas y no se precisa de un control fino, se suelen usar válvulas reductoras de acción directa.

Este tipo de válvulas trabajan de la siguiente manera:

En la puesta en marcha, la presión aguas arriba empuja el obturador lejos del asiento, permitiendo que el vapor fluya en el sistema aguas abajo.

Con una llave se comprime el resorte mediante el plato de control. La fuerza del resorte es transmitida a través del plato al empujador de la válvula que mantiene el obturador en posición totalmente abierta. A medida que la presión aguas abajo aumenta, actúa a través de la línea de toma de presión en la parte inferior del diafragma unido al extremo del empujador de la válvula.

La presión aguas abajo sigue aumentando hasta que la presión que actúa sobre el diafragma, supera la fuerza que ejerce el resorte y que mantiene el obturador en posición abierta, moviéndolo hacia el asiento de la válvula para modular el flujo y mantener la presión requerida aguas abajo.

Una característica importante en el funcionamiento de la válvula es el uso de un fuelle de compensación para eliminar el efecto de la diferencia de presión aguas arriba y aguas abajo en el obturador que puede producir ruido y vibraciones.

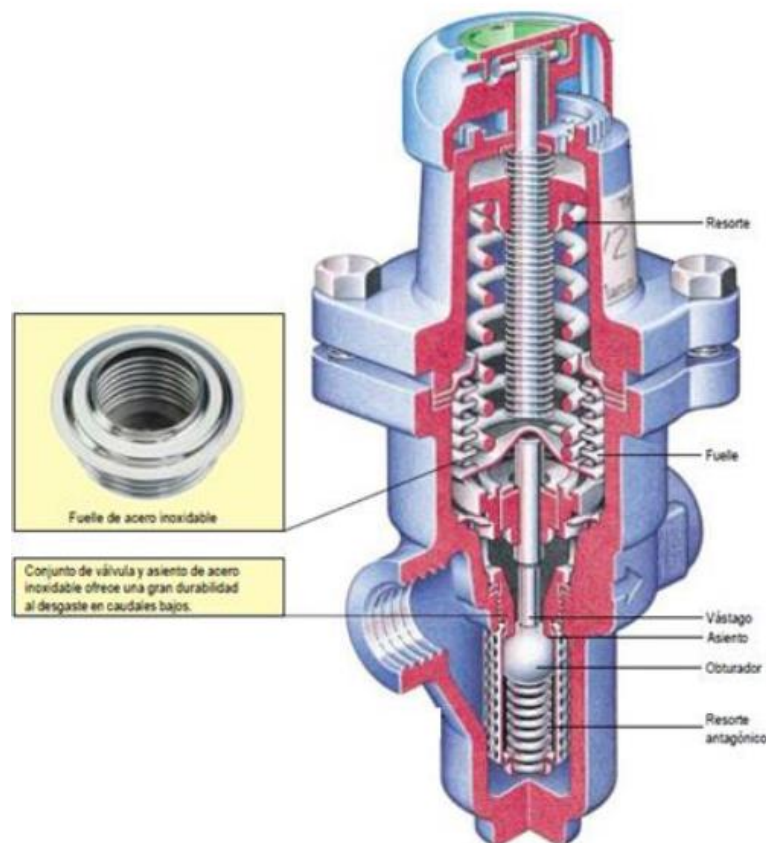


Ilustración 38 Válvula reductora de presión de acción directa

Fuente: Spirax Sarco

En los otros casos es mejor seleccionar una válvula con piloto, particularmente si se producen períodos sin demanda durante los cuales no deba aumentar la presión de salida (ver Ilustración 39).

Las válvulas reductoras de presión con piloto trabajan equilibrando la presión de salida con el resorte de control, éste mueve un pequeño obturador contra un asiento (el piloto). El fluido a través del asiento llega directamente al diafragma de la válvula principal, actuando sobre la válvula principal.

Bajo condiciones estables, la presión debajo del diafragma piloto equilibra la fuerza fijada en el resorte de ajuste. Esto asienta la válvula piloto permitiendo un paso de fluido constante a través del diafragma principal. Esto asegura que la válvula principal está también asentada para dar una presión de baja estable.

Cuando la presión de baja aumenta, la válvula piloto cierra, y la presión se libera del diafragma de la válvula principal a través del orificio de control, para cerrar la válvula principal.

Cualquier variación de caudal o de presión será inmediatamente captada por el diafragma piloto, el cual actuará para ajustar la posición de la válvula principal, asegurando una presión de baja constante.

Con tal de conseguir las mejores condiciones de trabajo posibles, se recomienda usar un tubo detector de presión externo. Esto resulta más importante cuando la válvula trabaja cerca de su capacidad máxima, o bajo condiciones de flujo críticas.

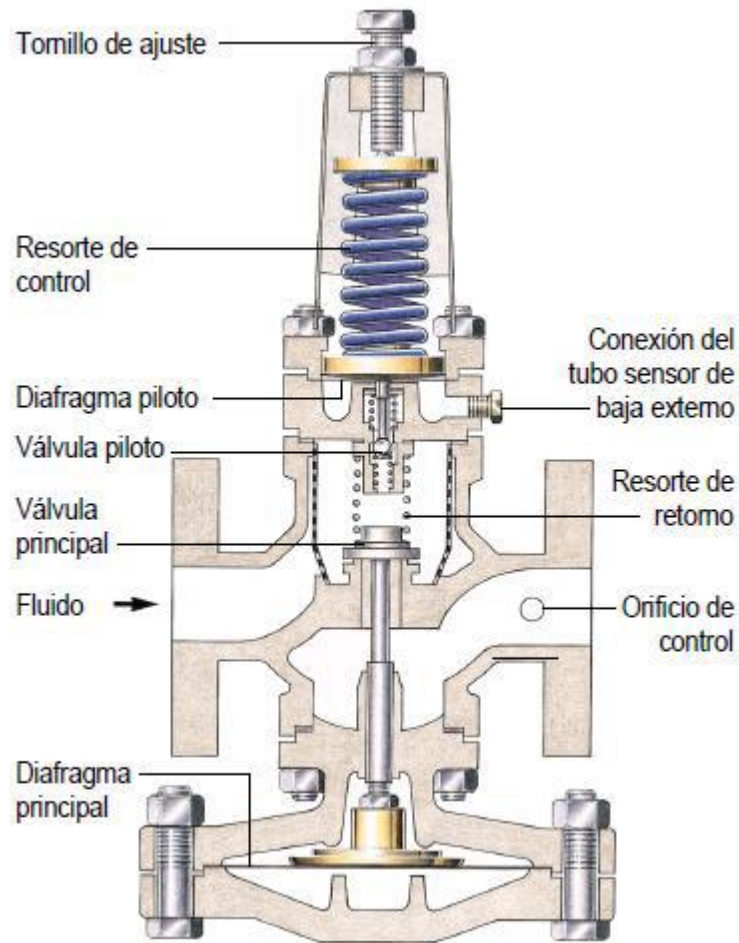


Ilustración 39 Válvula reductoras de presión con piloto

Fuente: Spirax Sarco

Igual que sucede con todas las válvulas de control, se debe evitar el sobredimensionamiento de las válvulas reductoras. Una válvula que trabaje habitualmente demasiado cerca de su asiento, puede sufrir erosiones por el paso constante de vapor a alta velocidad. Además en esta posición, cualquier pequeño movimiento de esta válvula producirá un cambio de caudal relativamente importante. Con un modelo más pequeño, correctamente dimensionado, se obtendría un mejor ajuste y el riesgo de avería sería menor.

Cuando es necesario provocar descensos de presión muy elevados, con relaciones de presiones mayores que 10:1, es preferible trabajar con dos o más válvulas instaladas en serie como podemos observar en la Ilustración 40.

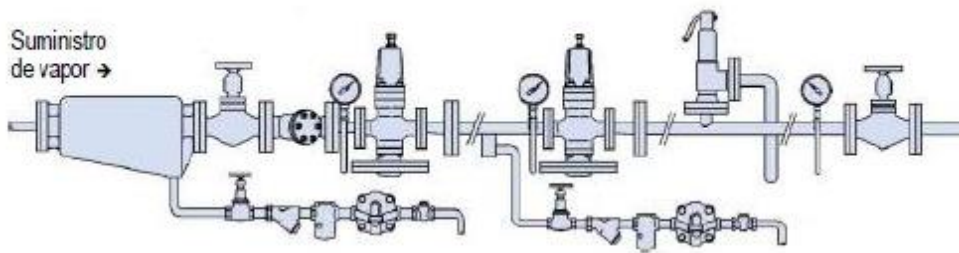


Ilustración 40 Válvulas reductoras de presión en serie

Fuente: Spirax Sarco

Si la válvula va a trabajar por debajo de las condiciones de carga inferiores, para alargar su vida sería mucho mejor poner dos válvulas más pequeñas en paralelo (ver Ilustración 41). Esta no es una regla tajante, pero si la carga baja es un 10% (o menos) de la carga máxima entonces son preferibles dos válvulas. Las válvulas en paralelo también se usan donde es vital que la aportación de vapor no sea interrumpida. Esta solución asegura un control apropiado de la presión cuando alguna válvula está siendo revisada.

Si bien el dimensionamiento es importante para el buen funcionamiento de una válvula reductora, también lo es su instalación correcta, y puesto que la mayor parte de los problemas de una válvula reductora son causados por la presencia de humedad o suciedad, se han de instalar, antes de la válvula, un separador y un filtro de malla fina. El filtro debe ser colocado lateralmente para evitar que el cuerpo se llene de agua y para garantizar que toda la superficie de filtración sea efectiva.

Si la tubería o la instalación de salida no pueden resistir la presión de entrada, se debe instalar una válvula de seguridad a la salida de la válvula reductora, regulada a la máxima presión que pueda soportar esta parte de la instalación y además con una capacidad de descarga de vapor igual a la que puede pasar a través de la válvula, totalmente abierta, a esta presión máxima.

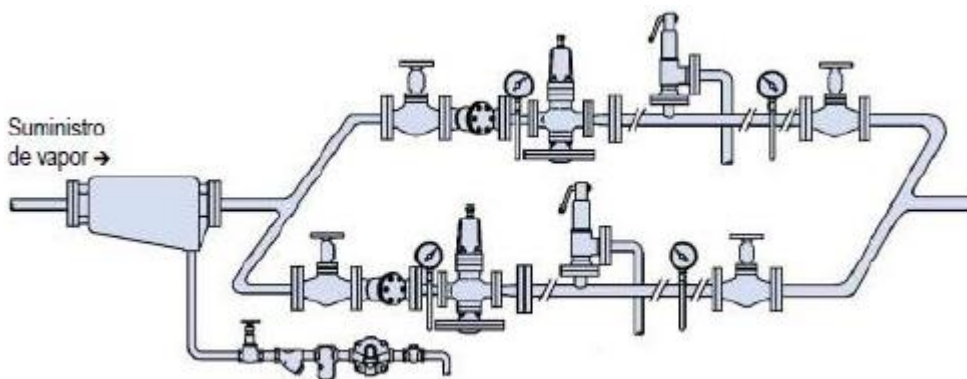


Ilustración 41 Válvulas reductoras de presión en paralelo

Fuente: Spirax Sarco

3.5.8 Equipo de inyección de vapor

Consistente en una tubería de entrada de vapor en la que se encuentran una serie de inyectores para introducir el vapor saturado en el agua almacenada. Suelen estar situados en la parte más baja del acumulador y están distribuidos equitativamente a lo largo del mismo. Su diseño es tal, que permita la mezcla lo más homogénea posible entre el agua y el vapor independientemente del caudal de vapor que entre. Se colocan con un cierto ángulo de inclinación para evitar el choque directo del vapor contra las paredes internas del acumulador y así evitar su erosión. Lo ideal sería distintas orientaciones también. Es primordial saber que la capacidad de los inyectores se reduce cuando la presión del depósito aumenta, ya que la presión diferencial entre vapor inyectado y la del depósito también se ve reducida. Una instalación normal del sistema de inyección de vapor es la mostrada en la ilustración 42.

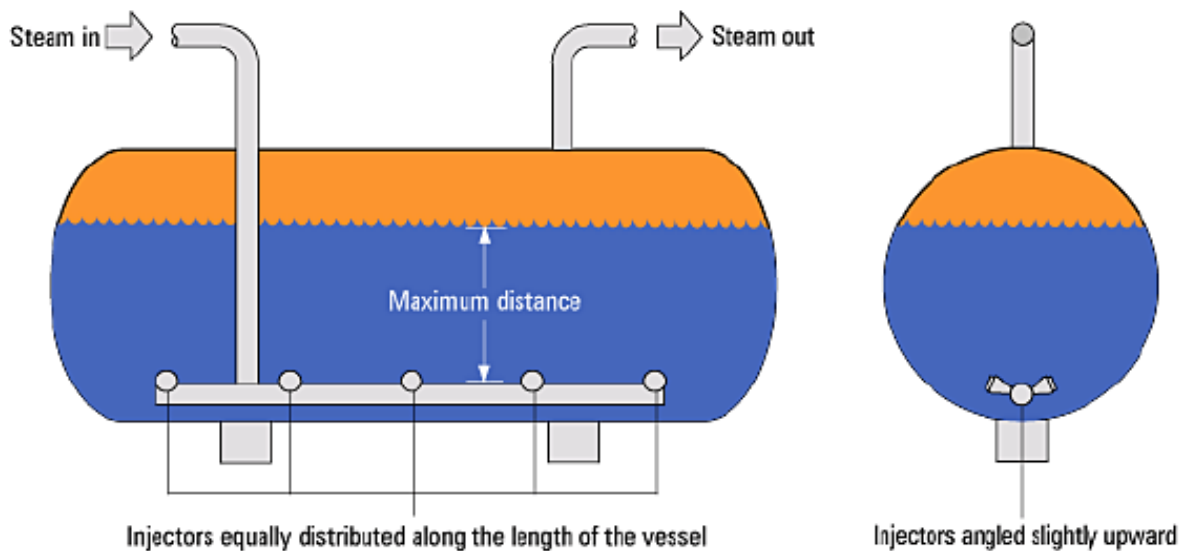


Ilustración 42 Instalación de inyectores en un acumulador de vapor

Fuente: Spirax Sarco

En la descarga de los inyectores circulan agua y vapor muy calientes, junto a pequeñas burbujas de vapor condensado, a muy alta velocidad, lo que promueve un flujo turbulento en la corriente que facilita la mezcla entre el agua y el vapor.

Los sistemas de inyección podrán ser de tipo electroneumático o de control autoaccionado. Los de control autoaccionado son una solución más económica mientras que los neumáticos o eléctricos nos ofrecen un control preciso de la temperatura. Dependiendo de los requerimientos de nuestra planta, un sistema o el otro será el más adecuado.

Nuestro equipo de inyección garantizará la mezcla completa del vapor y del fluido en el inyector, proporcionando así un calentamiento silencioso, eficiente y económico. Asimismo, evita la estratificación de la temperatura en el tanque, manteniendo así una alta eficiencia.

En depósitos de gran longitud (como en la PS10 y PS20), se consigue una mejor distribución si se colocan dos o más tuberías de entrada. En cada caso, es importante que las tuberías estén muy bien unidas a la línea principal de suministro de vapor, es decir, a la salida del generador de vapor.

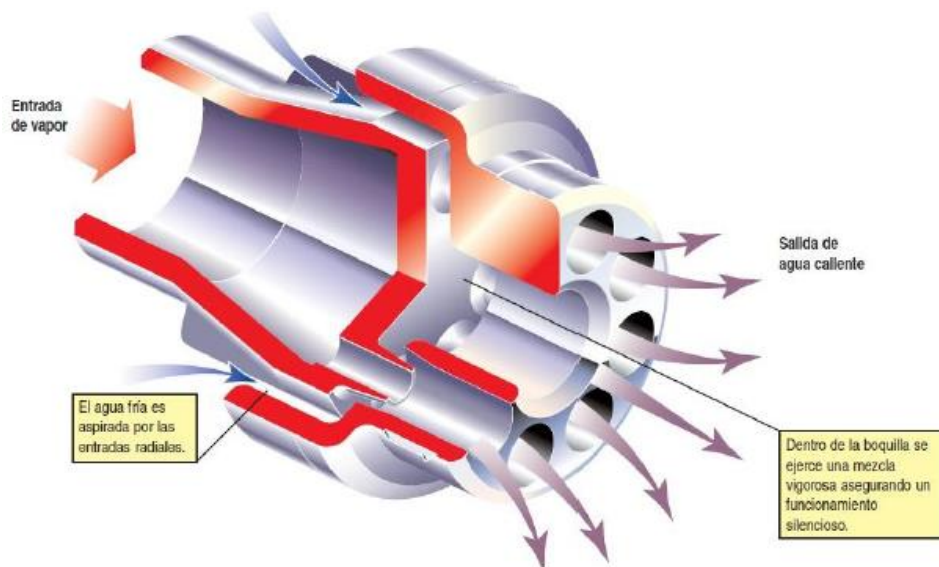


Ilustración 43 Funcionamiento inyector de vapor

Fuente: Spirax Sarco

Los inyectores deberán estar situados en la parte más baja del acumulador dejando la mayor cantidad de agua posible sobre ellos, para alcanzar el mayor volumen de agua.

3.5.9 Tuberías

La tubería que va del receptor al acumulador se debe dimensionar teniendo en cuenta la velocidad a la que va el vapor y la máxima producción del receptor. Y la tubería del acumulador a la válvula de reducción de presión se diseña teniendo en cuenta la sobrecarga instantánea y la velocidad máxima admisible a la que va el vapor.

A continuación muestro las velocidades a la que fluye el vapor para distintas presiones de funcionamiento:

Presión del vapor (bar)	Velocidad vapor (m/s)
1,5	30
5	35
10	40
25	50
100	60

Tabla 2 Velocidades del vapor

Fuente: Spirax Sarco

3.5.10 Otros elementos

- **Mirilla:** para controlar que el nivel del agua en el interior del acumulador no sobrepase un nivel determinado se coloca una mirilla de cristal, como la de la ilustración 44. Su función es mostrar el nivel del agua del interior del acumulador. El cristal indicador está protegido con unas placas que lo rodean. Estas placas deben permitir la buena visibilidad del nivel de agua. La mirilla se conecta al acumulador mediante dos tuberías de pequeño diámetro, una para el agua y otra para el vapor. Hay que tener en cuenta que únicamente un 5% del agua acumulada se convertirá en vapor, por lo que la variación del nivel del agua no será muy grande. Aun así es esencial saber el nivel del agua. Obviamente, el indicador de nivel o mirilla debe ser apto para operar a la máxima presión de trabajo del acumulador. Únicamente será necesario un indicador de nivel.

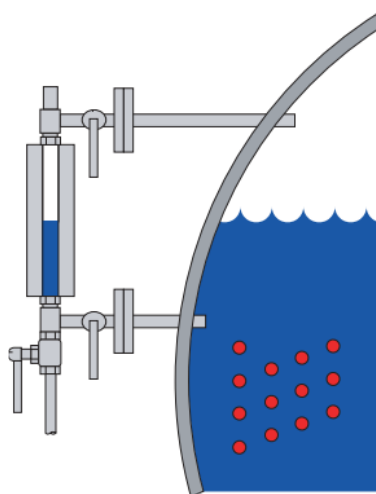


Ilustración 44 Mirilla

Fuente: Spirax Sarco

- **Manómetro y termómetro:** para controlar en todo momento la presión y temperatura del acumulador de vapor.
- **Válvulas de aislamiento:** también podemos encontrarnos este tipo de válvulas para aislar el conjunto de acumulación de la instalación en caso de mantenimiento o avería. Se colocaría una en la tubería de entrada de vapor al acumulador y en la tubería de salida de vapor.

3.6 Controles

Varios controles son necesarios para vigilar el funcionamiento del sistema, como son:

1. **Control del caudal de vapor:** mediante una válvula reguladora de presión.
2. **Control de la presión de vapor a proceso:** con una válvula reductora.
3. **Control del nivel del agua:** purgador y alimentación de agua.

3.7 Configuraciones típicas

Las instalaciones típicas del acumulador de vapor junto al generador de vapor y proceso que demanda la carga punta son:

3.7.1 Acumulador en serie con el generador de vapor

Esta es generalmente la configuración más moderna. Todo el vapor generado pasa a través del acumulador:

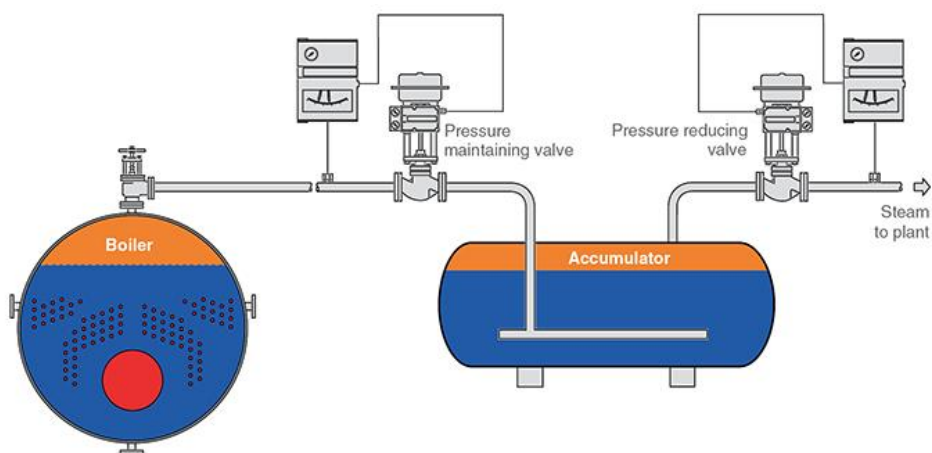


Ilustración 45 Acumulador en serie con el generador de vapor

Fuente: Spirax Sarco

3.7.2 Acumulador alejado del generador de vapor

Este tipo de configuración se usaba más antiguamente y es útil cuando el acumulador no se puede colocar en la principal línea de distribución de vapor. Las válvulas de control del acumulador han de comprobarse regularmente, ya que puede ocurrir que el vapor entre sobre la superficie de contacto entre el agua y el vapor, lo cual no genera ningún beneficio.

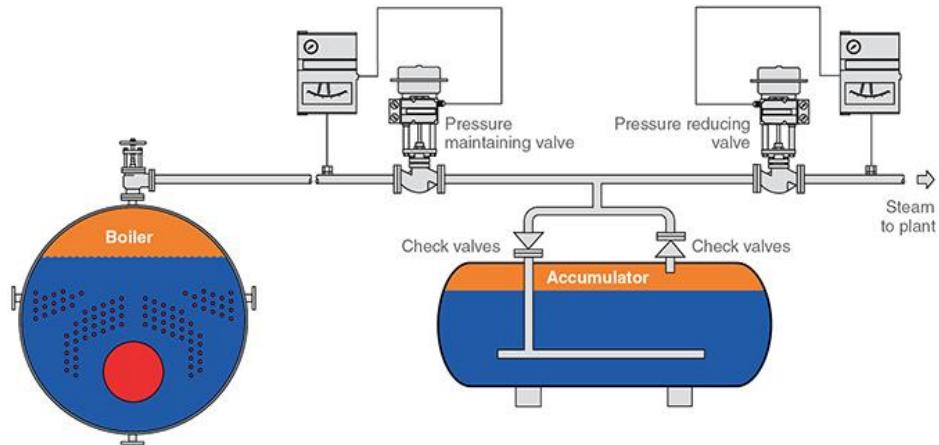


Ilustración 46 Acumulador alejado del generador de vapor

Fuente: Spirax Sarco

3.7.3 Acumulador conectado al proceso de baja presión

Este tipo de configuración se da en plantas en las que se precisa tanto vapor a la presión de generación como a presiones inferiores. En un proceso de secado, por ejemplo, siempre se necesita vapor a la presión de generación. Si se produce un pico de demanda causado por los consumidores de alta presión, la válvula de mantenimiento de presión sentirá una caída de presión y el vapor generado irá directamente a los consumidores de alta presión dejando así al acumulador encargado de suplir los consumos de menor presión durante este periodo. La válvula de mantenimiento de presión asegura que tanto los consumos de alta y baja presión estén atendidos.

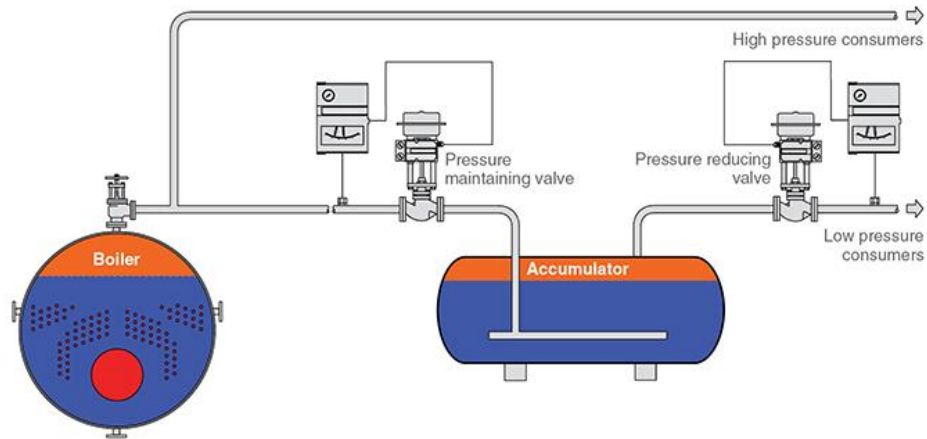


Ilustración 47 Acumulador conectado al proceso de baja presión

Fuente: Spirax Sarco

3.7.4 Acumulador conectado en serie/paralelo al generador

La caldera está funcionando a su presión nominal, por ejemplo a 10 bar, y el vapor es demandado a 5 bar. La válvula de reducción de presión A, reduce la presión entre la caldera y la línea de distribución que está demandando vapor a 5 bar, supliendo esta demanda. Si la demanda de vapor es superior a lo que está produciendo la caldera, y la presión en la línea de distribución de baja presión cae por debajo de, por ejemplo, 4,8 bar, la válvula B comienza a abrir para completar el suministro, dejando que el acumulador de vapor realice este suministro. La presión del acumulador caerá en este periodo. La capacidad de esta válvula debe ser acorde a la velocidad de descarga del acumulador, que será menor que la capacidad de la válvula reductora A.

La válvula C es una válvula de mantenimiento de presión que responde a la presión de la caldera. Si aumenta la presión porque ha disminuido la demanda de la planta, la válvula C abre. En este momento, se recarga el acumulador de vapor hasta su máxima presión, un poco inferior a la de la caldera. En este periodo de recarga, la válvula B permanece cerrada ya que la válvula A, parcialmente cerrada, se encarga de proporcionar el vapor suficiente a la planta, proporcionado por la caldera.

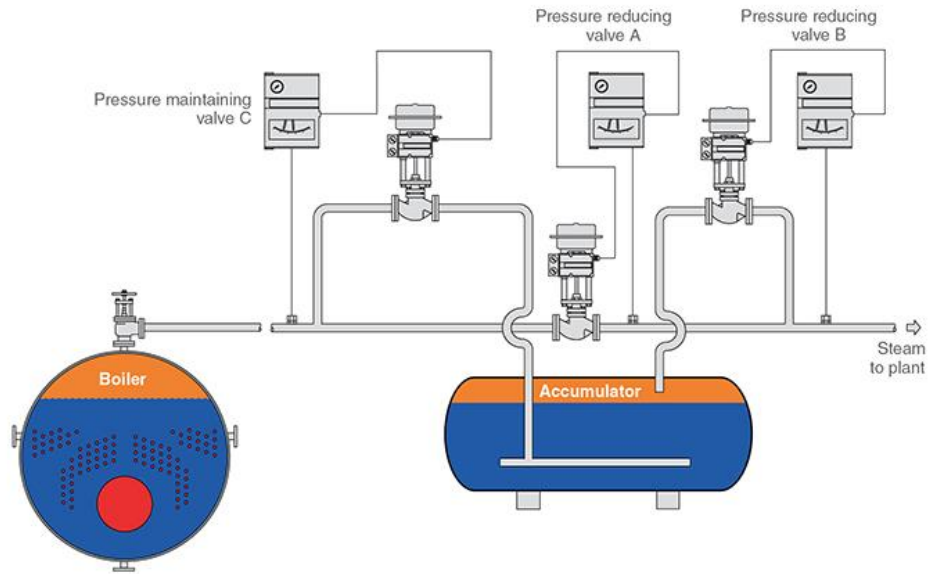


Ilustración 48 Acumulador conectado en serie/paralelo al generador

Fuente: Spirax Sarco

3.7.5 Instalación de un bypass en el acumulador

En ocasiones es necesario realizar el mantenimiento del acumulador y para ello se instala un sistema de bypass que hace que se siga operando paralelamente al mantenimiento. También se instala un bypass por si el acumulador da problemas en su funcionamiento y poder seguir operando. De esta manera lo que se consigue es aislar el acumulador del conjunto y así evitar fallos mayores. La mejor opción es una válvula stand-by de mantenimiento de presión.

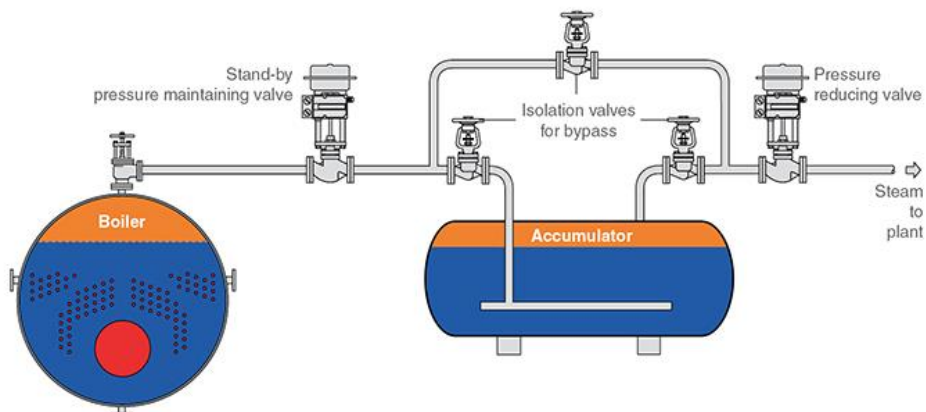


Ilustración 49 Instalación de un bypass en el acumulador

Fuente: Spirax Sarco

3.8 Fabricantes de acumuladores industriales

Hay varios fabricantes de acumuladores de vapor para instalaciones industriales entre los que se encuentran:

- HGSERVITEC calderas vapor, S.L. de Sant Boi de Llobregat (España)
- Manara Generatori di Vapore, empresa ubicada en Parma (Italia)



Ilustración 50 Acumulador Manara

Fuente: <http://www.manara.net/index.php/es/productos/acumuladores-de-vapor>

- Attsu, grupo situado en Móstoles (España)
- Bosch Industrial, tiene sede en Gunzenhausen (Alemania)
- Abbott & CO LTD, empresa de Newark (Reino Unido)
- ODENBERG ENGINEERING LTD , situada en Dublín (Irlanda)
- Parker Boiler Company, de California (Estados Unidos)
- Edwin Snowden & CO LTD, en Hull (Reino Unido)
- Aralsan LTD, ubicada en Turquía
- Bepis SA, ubicada en Polonia

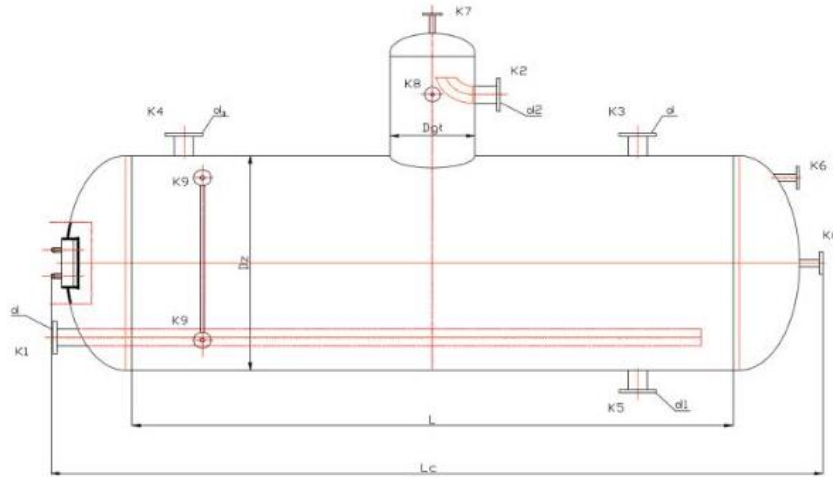


Ilustración 51 Acumulador Bepis de 1 MPa y 200 °C

Fuente: <https://bepis.pl/offer/steel-tanks/steam-accumulators/steam-accumulator-ruths-accumulators-horizontal-zp/>

Steam accumulator – Ruth's accumulators– horizontal BZP										
Type	V	Dz	D _{gt}	L	L1	D	DN1	DN2	DN3	Weight
	m ³	mm								
BZP 3,0/1250	3,0	1250	406	2760	2000	65	50	150	40	1100
BZP 4,0/1400	4,0	1400	406	2800	2000	65	50	150	40	1300
BZP 5,0/1400	5,0	1400	406	3500	2700	65	50	150	40	1450
BZP 6,0/1600	6,0	1600	508	3500	2500	65	50	150	40	1700
BZP 8,0/1600	8,0	1600	508	4500	3500	65	50	150	40	1900
BZP 10,0/1600	10,0	1600	508	5400	4500	100	100	150	40	2500
BZP 12,0/1800	12,0	1800	600	5000	4000	100	125	250	40	2990
BZP 15,0/1800	15,0	1800	600	6386	5400	100	125	250	40	3260
BZP 16,0/1800	16,0	1800	600	6786	5800	100	125	250	40	3440
BZP 18,0/1800	18,0	1800	600	7586	6600	100	125	250	40	3570
BZP 20,0/2000	20,0	2000	600	6888	5800	150	125	250	40	5200

Tabla 3 Dimensiones acumulador Bepis

Fuente: <https://bepis.pl/offer/steel-tanks/steam-accumulators/steam-accumulator-ruths-accumulators-horizontal-zp/>

- SEA CZ a.s., empresa ubicada en Zlín (República Checa)

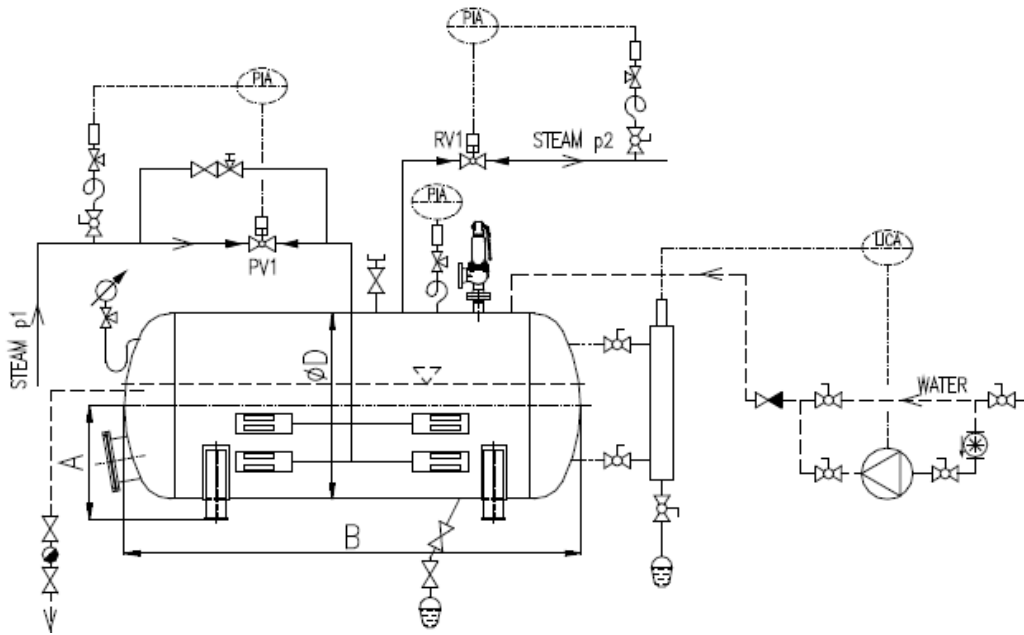


Ilustración 52 Esquema acumulador Sea CZ a.s.

Fuente: <http://www.seacz.cz/download/kl10-en.pdf>

- Sahala Work's (Varkaus, Finlandia)



Ilustración 53 Acumulador de Sahala Work's

Fuente: http://www.sahala.fi/sahala_works/default.asp?siteid=en&id=steam_accumulators

Los fabricantes encontrados son para instalaciones industriales convencionales, siendo poco afortunada la búsqueda de los acumuladores utilizados en centrales solares. Aun así, el acumulador que se utiliza en un sistema termosolar no se aleja en cuanto a diseño y materiales de los convencionales, ya que el fluido sigue siendo vapor y agua y las condiciones a las que está sometido pueden ser similares.

3.9 Comparación con el almacenamiento en sales fundidas

El almacenamiento térmico basado en tanques de sales fundidas es otra opción en plantas solares de concentración. Actualmente hay muchas más plantas con almacenamiento en sales fundidas que con vapor.

La mayoría de las plantas de cilindroparabólico con sistema de almacenamiento usan sales fundidas como medio de almacenamiento. Ejemplos de ello son Crescent Dunes de 110 MW y 10 horas de almacenamiento, Gemasolar de 17 MW y 15 horas de almacenamiento, La Africana de 50 MW y 7,5 horas, Cerro Dominador de 110 MW y 18 horas , entre otras muchas.

Las principales diferencias de estos dos sistemas de almacenamiento se pueden resumir en la siguiente tabla:

	Acumulador de vapor	Tanques de sales fundidas
Tiempo de almacenamiento	Minutos-pocas horas	Más de 8 horas
Fluido de almacenamiento	Agua a presión	Sal solar (60 % $NaNO_3$ y 40% KNO_3)
Calor específico o Cp	4,18 KJ/Kg·K	1,501 KJ/Kg·K
Densidad media	1000 Kg/m ³	1873 Kg/m ³
Rango de temperaturas de utilización	50 – 200 °C (Agua y vapor saturado)	> 400 °C
Tiempos de carga/descarga	Pequeños	Altos
Eficiencia media	92,4 %	95 %
Control	Fácil (controlando T y p)	Más complicado

Tabla 4 Comparación características del almacenamiento en vapor y sales fundidas.

Fuente: Elaboración propia

Los tanques de almacenamiento en vapor son caros ya que deben ser muy estables para aguantar los constantes cambios de presión y las consecuentes cargas termo-mecánicas.

Usando acumuladores de vapor contamos con la ventaja de que normalmente el fluido de trabajo es el mismo que el fluido de almacenamiento pero con las sales fundidas no tiene porqué ser así.

El fluido de trabajo puede ser aceite o vapor, aunque también hay plantas que usan las sales fundidas como fluido de trabajo y de almacenamiento (Solar Two, Andasol).

Los inconvenientes que nos podemos encontrar con el almacenamiento en sales fundidas son:

- Cristalización y solidificación: alrededor de los 240 °C las sales cristalizan y a partir de 220 °C solidifican. Una vez hayan solidificado es muy complicado que vuelvan a licuar, por ello los elementos del sistema en contacto con las sales deberán ir traceados eléctricamente para evitar la solidificación, además de proveer de tuberías de drenaje.
- Las sales son corrosivas, por lo que se requieren sistemas resistentes a la corrosión.
- Hay que evitar que las sales estén paradas durante largos periodos de tiempo cuando el tanque esta poco cargado, ya que se enfrían en pocos días (entre 6 y 12 días). Cuando el tanque está lleno tarda entre 150 y 360 días en alcanzar los 220 °C-240 °C, que son las temperaturas críticas.

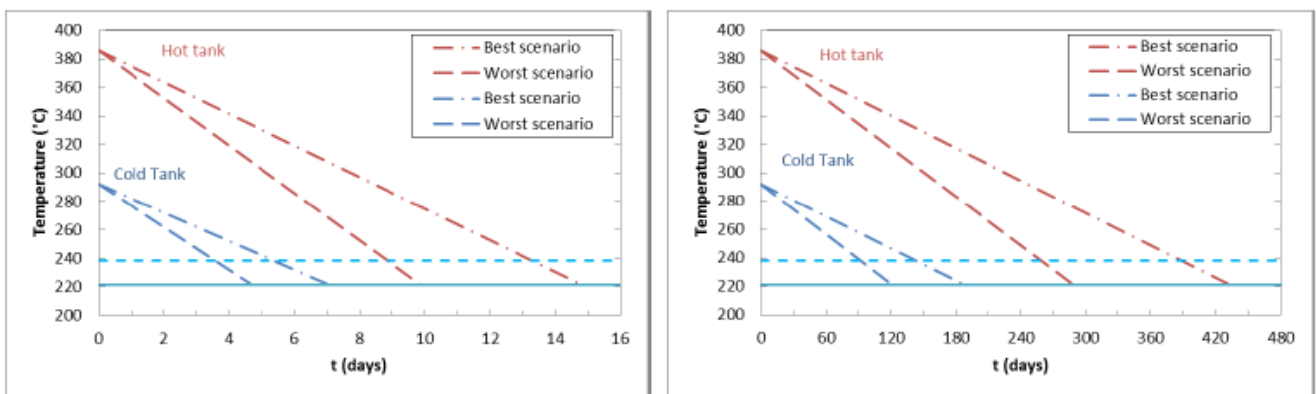


Ilustración 54 Evolución temperatura media de tanques

Fuente: Almacenamiento en centrales solares de Javier Pino

- Se requiere de un sistema de bombeo para pasar las sales del tanque caliente al tanque frío y viceversa. En cambio, en el acumulador de vapor el fluido se mueve por diferencias de presión.
- Las sales hay que fabricarlas y son caras. En cambio el agua es abundante y barata.
- Los tanques tienen que soportar elevadas temperaturas por lo que requieren un proceso de fabricación específico
- El fluido de trabajo a veces no coincide con el de almacenamiento. Cuando el fluido de trabajo es aceite hay que evitar el contacto directo con las sales fundidas. En este caso se requiere de un intercambiador de calor para calentar las sales del tanque caliente.

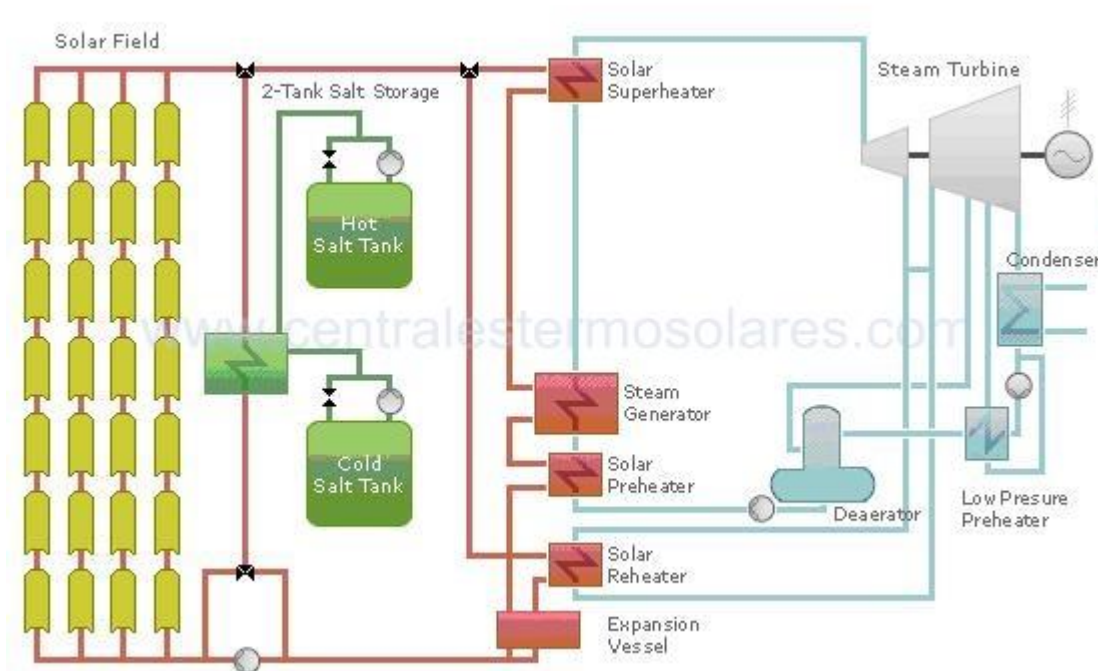


Ilustración 55 Esquema de bloques de una planta CCP con almacenamiento en sales fundidas

Fuente: Web centralestermosolares.com

Por otro lado, las ventajas del uso de acumuladores de vapor como sistemas de almacenamiento son las siguientes:

- Es una forma económica de almacenar energía
- Disponibilidad inmediata de la cantidad requerida de vapor
- El rendimiento del proceso es mayor debido a que se genera vapor directamente sin necesidad de un fluido intermedio
- Operación flexible y controlable por ser una instalación de vapor
- La tecnología es más madura que los tanques de sales (el acumulador de vapor en sí existe desde hace muchos años)
- Calidad de vapor constante y presión de vapor constante
- Vapor y agua se mantienen en equilibrio térmico a la temperatura de ebullición.

A parte, contamos con los beneficios del uso del vapor, como son:

- El agua es abundante y barata

- El vapor es un fluido limpio, puro, además de seguro. Por consiguiente se reducen los costes en los mecanismos de prevención ante fugas frente a los costes que se tienen con sales fundidas.
- El vapor tiene una alta capacidad calorífica
- El vapor es fácil de controlar debido a la relación p-T
- El vapor cede calor a temperatura constante
- El agua tiene un punto de congelación mucho más bajo que las sales

3.10 Principal aplicación del sistema de almacenamiento basado en vapor

Debido al poco tiempo de almacenamiento con el que se cuenta en este tipo de sistema de almacenamiento de energía térmica, la principal aplicación es suplir aquellos picos de demanda que se puedan producir para evitar la sobrecarga del generador de vapor. También durante el día, en los periodos de nubes y claros podría utilizarse el vapor acumulado para que la turbina pueda seguir operando. En cambio, con un sistema de almacenamiento de sales, al disponer de un mayor tiempo de almacenamiento, podemos hacer que la planta opere durante la noche y por largos periodos de tiempo.

4 MODELO ACUMULADOR DE VAPOR

El modelo a tratar constará de una serie de parámetros de entrada y salida. Podemos considerar nuestro modelo como una caja negra en la que nosotros introducimos unos datos de entrada y obtenemos unos datos de salida. Será un modelo bastante sencillo que represento gráficamente a continuación:



Los parámetros que introduciremos en nuestro modelo son aquellos de los que partimos o conocemos, como pueden ser la potencia eléctrica de la planta, el rendimiento del ciclo de potencia, el tiempo de almacenamiento, la presión máxima de trabajo y la presión mínima de funcionamiento del sistema de almacenamiento. Por otro lado, las variables que obtendremos a la salida y a partir de las cuales realizaremos un análisis podrán ser la masa de agua a almacenar de la que se obtiene el volumen del acumulador que es nuestro parámetro objetivo, el tamaño del sistema de almacenamiento para una potencia dada.

También contamos con variables que dependen del tiempo, como es el caudal de vapor.

El objetivo de este modelo es determinar un orden de magnitud del acumulador de vapor para luego analizar en función de las variables de entrada, la cantidad de agua necesaria y el tamaño del acumulador necesario para abastecer la demanda.

Supondremos en este modelo que no hay pérdidas de calor al ambiente y que la turbina funciona al 100 % de carga.

Las centrales solares de torre trabajan con el ciclo de potencia Rankine, por lo que las ecuaciones para hallar el caudal de vapor producido por el generador se basarán en este ciclo termodinámico.

Primero calcularemos el calor térmico que hay que aportar al ciclo de potencia para producir una determinada potencia eléctrica:

$$\mathbf{Rendimiento}_{ciclo} = \frac{P_{electrica}}{Q_{térmico}}$$

Para hallar el caudal de vapor que demanda el ciclo de potencia usamos la siguiente ecuación:

$$Q_t = \dot{m}_v * (h_{out} - h_{in}) \quad [I]$$

Siendo:

$Q_t [kW]$: Calor térmico aportado en el receptor

$\dot{m}_v \left[\frac{Kg}{s} \right]$: Caudal de vapor producido en el ciclo de potencia

$h_{out} \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$: Entalpía a la salida del receptor

$h_{in} \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$: Entalpía a la entrada del receptor

La masa de vapor generada sería:

$$M_v = \dot{m}_v * t_{alm}$$

Siendo:

t_{alm} : Tiempo de almacenamiento en segundos

M_v : Masa de vapor en kilogramos

Una vez calculada la masa de vapor, calculamos la masa de agua necesaria para almacenar el volumen de vapor que va a demandar mi ciclo de potencia, mediante un balance de energía en el acumulador. Despreciando las pérdidas térmicas, la energía al final del periodo de carga ha de ser igual a la suma de la energía del vapor cedido y de la energía al final del periodo de descarga. Por tanto, el balance sigue la siguiente ecuación:

$$(M_a + M_v) * H_S(P_M) = M_a * H_S(P_m) + M_v * \frac{H_T(P_M) + H_T(P_m)}{2} \quad [II]$$

Siendo:

$M_a [Kg]$: Masa de agua en el instante final carga

$M_v [Kg]$: Masa de vapor entregado

$H_S(P_M) \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$: Entalpía sensible a la presión máxima

$H_S(P_m) \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$: Entalpía sensible a la presión mínima

$H_T(P_M) \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$: Entalpía total a la presión máxima

$H_T(P_m) \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$: Entalpía total a la presión mínima

Suponemos que el vapor descarga a una entalpía media, como indico en la ecuación. Las entalpías dependen de la presión y la temperatura, por lo que la única incógnita es la masa del agua, ya que las entalpías se pueden calcular.

Este modelo asume que toda la energía necesaria para la vaporización la proporciona el agua líquida.

Del balance anterior, despejamos la masa de agua:

$$M_a = M_v * \frac{0.5 * [H_T(P_M) + H_T(P_m)] - H_S(P_M)}{H_S(P_M) - H_S(P_m)}$$

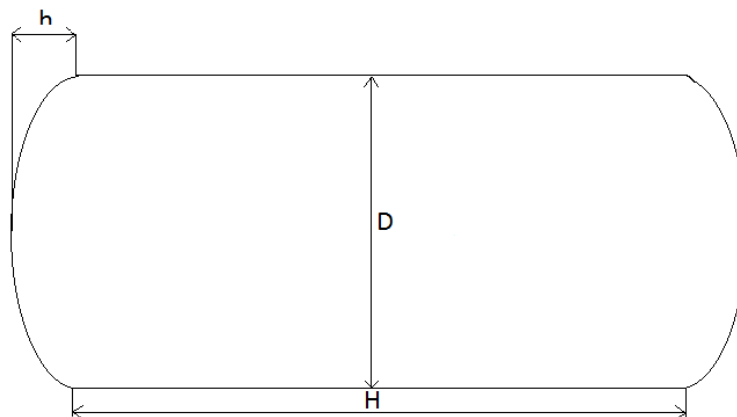
Una vez hallada la masa de agua a almacenar en el acumulador de vapor, podemos calcular el volumen del acumulador. El volumen del acumulador (V_A) se calcula en función del volumen total ocupado por el agua al final del período de carga (entre el 50 y el 90 %) y de la densidad del agua a la presión máxima. Si tomamos un porcentaje del 80 %:

$$V_{acumulador} = \frac{M_a + M_v}{0.8 * \rho} \quad \text{[III]}$$

La presión máxima corresponde a la presión del vapor que entra en el acumulador y la presión mínima a la presión del proceso que demanda la carga punta.

Para ver el orden de magnitud del volumen que hemos calculado lo podemos comparar con el volumen equivalente a una piscina olímpica. Por ejemplo una piscina olímpica de 50 metros de largo, 25 de ancho y 1.5 metros de profundidad.

Más concretamente, el recipiente que estamos analizando es un depósito horizontal con la carcasa cilíndrica cuya cabeza y fondo es elipsoidal. Como indico en el siguiente dibujo:



Su volumen total puede definirse a partir de los siguientes volúmenes:

$$V_{cilindro} = \pi * R^2 * H$$

$$V_{cabeza\ y\ fondo} = (\pi * D^2 * h_{cab})/6$$

Por lo tanto,

$$V_{deposito} = V_{cilindro} + 2 * V_{cabeza\ y\ fondo} = \frac{\pi * D^2}{12} (3H + D)$$

Estas ecuaciones nos servirán para saber de qué longitud, diámetro y altura es el acumulador aproximadamente.

No hay límites teóricos sobre el tamaño del acumulador, pero consideraciones prácticas impondrán restricciones. En la práctica el tamaño del acumulador se basa en el almacenamiento necesario para suplir los picos de demanda, a una caída de presión admisible, mientras producimos vapor seco a una velocidad de liberación adecuada a partir de la superficie de agua.

Posteriormente, para compararlo con un sistema de almacenamiento de sales, se utiliza la relación de ecuaciones que indico a continuación.

Calcularemos el volumen de los tanques de sales para generar la misma cantidad de vapor y variando los tiempos de almacenamiento (tener en cuenta que en sales el tiempo de almacenamiento es muy superior al que se suele tener en un acumulador de vapor)

Como las sales pierden energía sensible de un depósito a otro, la ecuación que rige la energía que almacenan es la siguiente:

$$Q_t = \dot{m}_{sales} * C_{p,sales} * (T_{tc} - T_{tf})$$

Siendo:

Q_t [W]: Calor térmico aportado en el receptor

\dot{m}_{sales} [Kg/s]: Caudal de sales trasegando

C_p [KJ/Kg · K]: Calor específico medio de las sales

T_{tc} [°C]: Temperatura del tanque caliente

T_{tf} [°C]: Temperatura del tanque frío

Para hallar la masa de sales, multiplicamos el caudal de sales por el tiempo de almacenamiento:

$$M_{sales} = \dot{m}_{sales} * t_{almacenamiento}$$

Y dividiendo entre la densidad de las sales, obtendremos el volumen de sales que tiene que ir del tanque frío al tanque caliente. Finalmente, cada tanque deberá tener un margen de seguridad, como por ejemplo del 25 %.

Y básicamente este será el modelo a implementar. Posteriormente, explico en detalle cada simulación realizada y los resultados obtenidos. Así como un breve análisis de los mismos.

5 SIMULACIONES Y ANÁLISIS

Para realizar la simulación y posteriormente analizar los resultados, podemos utilizar una serie de programas que nos facilitan la resolución de las ecuaciones, como puede ser Microsoft Excel, Matlab o EES (Engineering Equation Solver). Decidí utilizar EES por haberlo usado con mayor frecuencia que los demás programas de cálculo.

Por lo tanto, una vez introducidas las ecuaciones anteriores en el programa EES, realizamos una serie de simulaciones para analizar el sistema de almacenamiento, en primer lugar el tamaño del acumulador de vapor para una demanda de potencia eléctrica determinada.

Para no alejarnos de la realidad, comenzamos analizando los sistemas de almacenamiento de las plantas PS-10, PS-20 y Khi Solar One. Primero veremos el orden de magnitud de los acumuladores de vapor y posteriormente lo compararemos con el equivalente en sales, es decir, para la misma producción de vapor, de qué tamaño serían los tanques de sales teniendo en cuenta que se almacena durante más tiempo.

Nos basaremos prácticamente en el mismo modelo pero partiendo de datos distintos.

5.1 Análisis sistema de almacenamiento de la PS10

En primer lugar, introduciremos los datos en el modelo de EES más cercanos a la realidad para ver el orden de magnitud del sistema de almacenamiento que estamos analizando. Para así poder compararlo con los resultados de las próximas simulaciones.

Los datos han sido obtenidos de la ilustración 56 mostrada a continuación. Partimos de una potencia eléctrica de 10 MW, una temperatura y presión de generación de 250 °C y 40 bar, una temperatura y presión de condensación de 50 °C y 0.06 bar y un tiempo de almacenamiento de 50 minutos.

El condensador lo consideraremos isobárico, es decir, en su salida hay agua saturada ($x=0$).

A falta de la presión de vapor vivo y del rendimiento del ciclo, supongo estos parámetros. La presión de vapor vivo la establezco en 20 bar, de este modo el salto de presiones en el acumulador de vapor entre el inicio y el final es de 20 bar y el rendimiento del ciclo Rankine del 27,5 %, ya que los valores oscilarán entorno a ese porcentaje. Por otro lado, hay que tener en cuenta que para

diseñar el sistema de almacenamiento de vapor se suelen utilizar condiciones inferiores a las nominales.

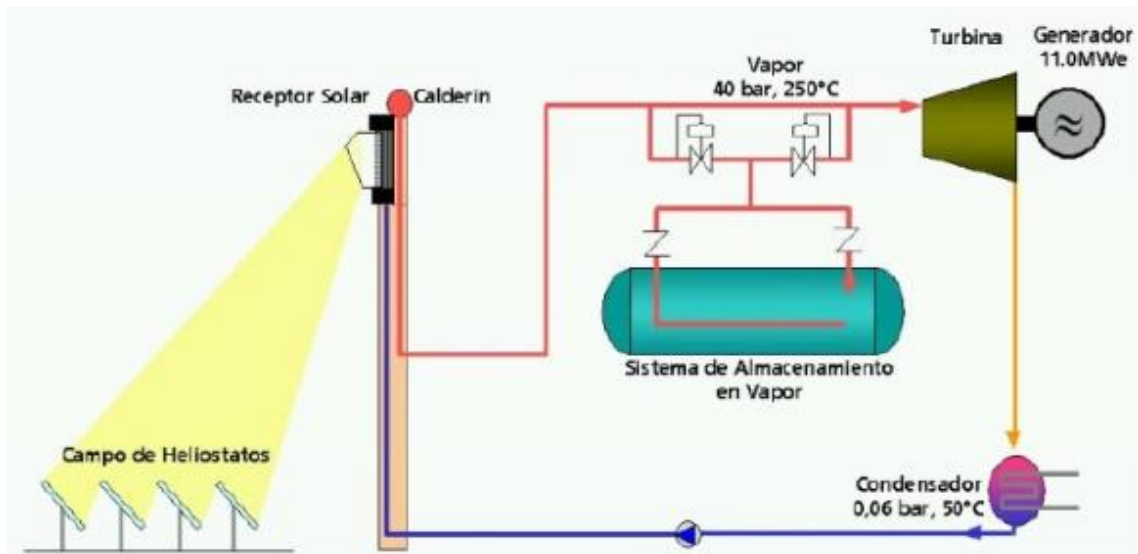


Ilustración 56 Esquema de principio de la planta PS10

Fuente: Final Technical Progress Report PS10

A continuación, muestro las ecuaciones introducidas en EES y los resultados obtenidos:

Ecuaciones en EES:

"Modelo Sistema de Almacenamiento basado en vapor PS10"	
"PARÁMETROS DE ENTRADA"	
$P_e = 10 \cdot 10^6$ [We]	"Potencia eléctrica turbina o potencia de salida"
$t_a = 50$ [min]	"Tiempo de almacenamiento"
$Rend_c = 0.275$	"Rendimiento del ciclo Rankine"
$p_c = 0.06$ [bar]; $T_c = 50$ [°C]	"Condiciones condensación"
$p_r = 40$ [bar]; $T_r = 250$ [°C]	"Condiciones receptor"
$p_w = 20$ [bar]	"Condiciones vapor vivo"
$h_{out} = \text{enthalpy}(\text{Steam}, x=1, P=p_w)$	"Salida del receptor. Vapor saturado"
$h_{in} = \text{enthalpy}(\text{Water}, T=T_c, P=p_w)$	"Entrada receptor. Agua a Tcondensación aprox"
$\rho_w = \text{density}(\text{Water}, x=0, P=p_r)$	
$h_{spmax} = \text{enthalpy}(\text{Water}, x=0, P=p_r)$	
$h_{spmin} = \text{enthalpy}(\text{Water}, x=0, P=p_w)$	
$h_{tpmax} = \text{enthalpy}(\text{Water}, x=1, P=p_r)$	
$h_{tpmin} = \text{enthalpy}(\text{Water}, x=1, P=p_w)$	
$D = 3$ [m]	"Diámetro estimado acumulador"
"PARÁMETROS DE SALIDA"	
$Q_t = P_e / Rend_c$	"Q térmico"
$Q_t = q_v \cdot (h_{out} - h_{in}) \cdot 10^3$	"Caudal de vapor"
$M_v = q_v \cdot t_a \cdot 60$	"Masa de vapor"
$M_a = M_v \cdot ((0.5 \cdot (h_{tpmax} + h_{tpmin}) - h_{spmax}) / (h_{spmax} - h_{spmin}))$	"Masa agua"
$V_{ac} = (M_a + M_v) / (0.8 \cdot \rho_w)$	"Volumen de acumulación total"
$V_{1ac} = V_{ac} / 4$	"Volumen de un acumulador"
$Piscina_{olimpica} = V_{ac} / (50 \cdot 25 \cdot 1.5)$	"Volumen equivalente piscina olímpica"
$H = 1/3 \cdot ((12 \cdot V_{1ac}) / (\pi \cdot D^2) - D)$	"Longitud aproximada acumulador"
$dif_p = p_r - p_w$	
$M = M_v / V_{ac}$	

Resultados:

$D = 3$ [m]	$dif_p = 20$ [bar]	$H = 23.72$ [m]	$h_{in} = 211$ [KJ/Kg]
$h_{out} = 2799$ [KJ/Kg]	$h_{spmax} = 1087$ [KJ/Kg]	$h_{spmin} = 908.7$ [KJ/Kg]	$h_{tpmax} = 2801$ [KJ/Kg]
$h_{tpmin} = 2799$ [KJ/Kg]	$M = 60.31$ [Kg/m ³]	$M_a = 404362$ [Kg]	$M_v = 42158$ [Kg]
$Piscina_{olimpica} = 0.3728$	$p_c = 0.06$ [bar]	$P_e = 1.000E+07$ [We]	$p_r = 40$ [bar]
$p_{vv} = 20$ [bar]	$Q_t = 3.636E+07$ [Wt]	$q_v = 14.05$ [Kg/s]	$Rend_c = 0.275$
$\rho_w = 798.5$ [kg/m ³]	$t_a = 50$ [min]	$T_c = 50$ [°C]	$T_r = 250$ [°C]
$V_{1ac} = 174.8$ [m ³]	$V_{ac} = 699$ [m ³]		

En un primer análisis de la PS-10, vemos que el volumen del acumulador para un almacenamiento de 50 min sería de unos 700 m^3 , lo que equivaldría a menos de la mitad de una piscina olímpica. En la tabla siguiente resumo lo obtenido:

Potencia eléctrica (MWe)	Presión del receptor (bar)	Presión de la turbina (bar)	Tiempo de almacenamiento (minutos)	Volumen total almacenamiento (m^3)
10	40	20	50	699

Tabla 5 Análisis inicial PS10

Realmente la planta cuenta con cuatro acumuladores, por lo que cada acumulador sería de 174.75 m^3 .

Ahora vamos a ver cómo cambiaría el tamaño del acumulador si vamos aumentando el tiempo de almacenamiento, manteniendo constantes las presiones mínima (20 bar) y máxima (40 bar).

Tiempo de almacenamiento (minutos)	Cantidad de vapor (Kg)	Cantidad de agua (Kg)	Volumen total almacenamiento (m^3)	Volumen equivalente piscina olímpica
10	8432	80872	139.8	0.07
30	25295	242617	419.4	0.22
50	42158	404362	699	0.37
70	59021	566107	978.6	0.52
90	75884	727852	1258	0.67
110	92747	889597	1538	0.82
130	109610	1050000	1817	0.97
150	126474	1213000	2097	1.12
170	143337	1375000	2377	1.27
190	160200	1537000	2656	1.42
210	177063	1698000	2936	1.57

Tabla 6 Evolución del tamaño del acumulador en función del tiempo de almacenamiento

Presión máxima: 40 bar; Presión mínima: 20 bar

A medida que aumenta el tiempo de almacenamiento, el acumulador necesario es mayor. Si acumulamos vapor durante 4 horas, necesitaríamos un tanque equivalente a casi dos piscinas olímpicas de tamaño. Por ello no podemos igualar los tiempos de almacenamiento que se conseguiría con los tanques de sales, que por las altas temperaturas a las que pueden estar, se

consigue almacenar la energía durante más de cuatro horas. Siendo el tamaño necesario del almacenamiento inferior que el que necesitaríamos si acumuláramos en vapor.

En la ilustración 57 vemos como aumenta linealmente el volumen de acumulación conforme aumenta el tiempo de almacenamiento.

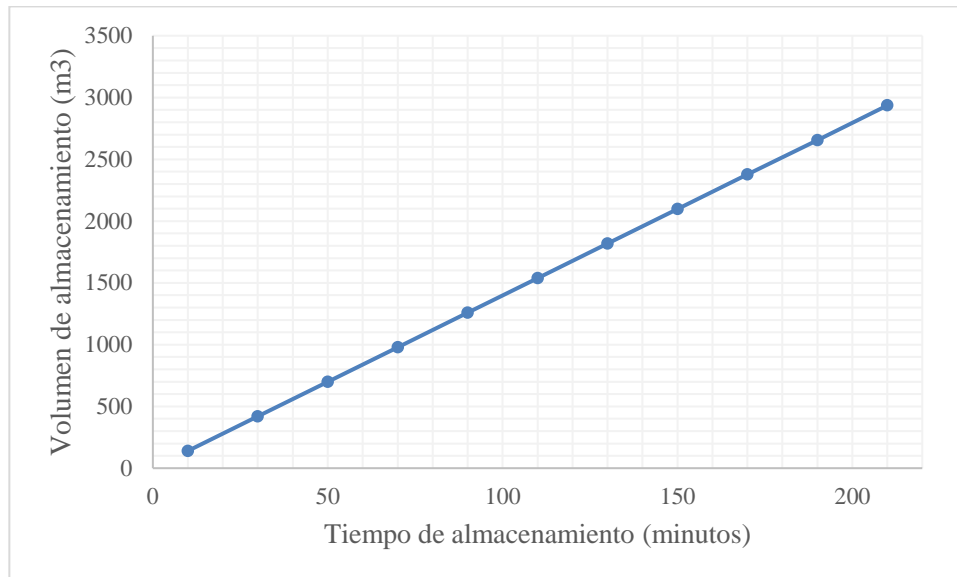


Ilustración 57 Evolución del tamaño del acumulador en función del tiempo de almacenamiento

Presión máxima: 40 bar; Presión mínima: 20 bar

A continuación, aun sabiendo que el rendimiento depende expresamente de la temperatura, si variamos este manteniendo constantes los demás parámetros, era de esperar que conforme mejora el rendimiento, el sistema de almacenamiento necesario es menor.

La eficiencia del ciclo Rankine se mejoraría aumentando el trabajo entregado a la turbina y las acciones que se podrían llevar a cabo son:

- Reducir la presión del condensador: teniendo en cuenta que el vapor saldrá más húmedo y puede erosionar los alabes de la turbina. Lo que se consigue es disminuir el calor rechazado.
- Aumentar la presión de la caldera (en este caso, del receptor): también contamos con la desventaja de la humedad que se genera en el vapor.
- Sobrecalentar el vapor que entra en la turbina: más conveniente ya que se disminuiría la humedad del vapor. Habría que tener en cuenta los límites de temperatura de los materiales.

- Escalonar la expansión de la turbina: introduciendo recalentamientos intermedios en la turbina dando lugar a cuerpos de alta, media y baja presión de la turbina.
- Realizar extracciones de vapor en la turbina para calentar el agua de entrada al receptor. Es la opción más complicada técnicamente de llevar a cabo y de la que obtendríamos un aumento de rendimiento menor.

Rendimiento ciclo Rankine	Volumen de acumulación (m^3)
0.270	712
0.275	699
0.280	687
0.285	675
0.290	663
0.295	652
0.300	641
0.305	630
0.310	620
0.315	610
0.320	601
0.325	592
0.330	583
0.335	574
0.340	565

**Tabla 7 Evolución del tamaño del acumulador en función de la eficiencia del ciclo Rankine
Presión receptor = 40 bar; Presión de vapor = 20 bar**

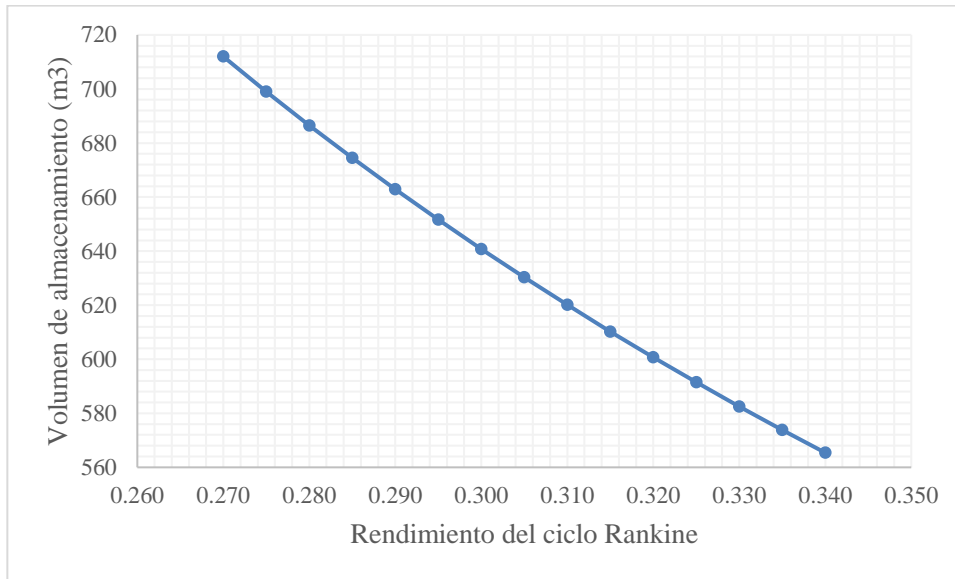


Ilustración 58 Evolución del tamaño del acumulador en función del rendimiento del ciclo Rankine

Presión receptor = 40 bar; Presión de vapor = 20 bar

Ahora analizaremos el cambio de tamaño si cambiamos la presión máxima, es decir, la presión del vapor al entrar en el acumulador. Supondremos los demás parámetros constantes y una presión de funcionamiento de la turbina de 20 bar (presión mínima o presión que demanda la carga punta).

Presión máxima (bar)	Caída de presión (bar)	Masa de agua (Kg)	Volumen de almacenamiento total (m ³)	Volumen de un acumulador (m ³)
100	80	114515	284.4	71.1
95	75	122085	294.6	73.64
90	70	130558	306.1	76.52
85	65	140132	319.2	79.8
80	60	151074	334.4	83.59
75	55	163744	352.1	88.01
70	50	178642	373	93.25
65	45	196489	398.3	99.58
60	40	218355	429.5	107.4
55	35	245919	469.1	117.3
50	30	281961	521.1	130.3
45	25	331465	592.9	148.2
40	20	404362	699	174.8
35	15	523751	873.5	218.4

Tabla 8 Evolución del tamaño del acumulador en función de la presión máxima de almacenamiento. Presión mínima = 20 bar

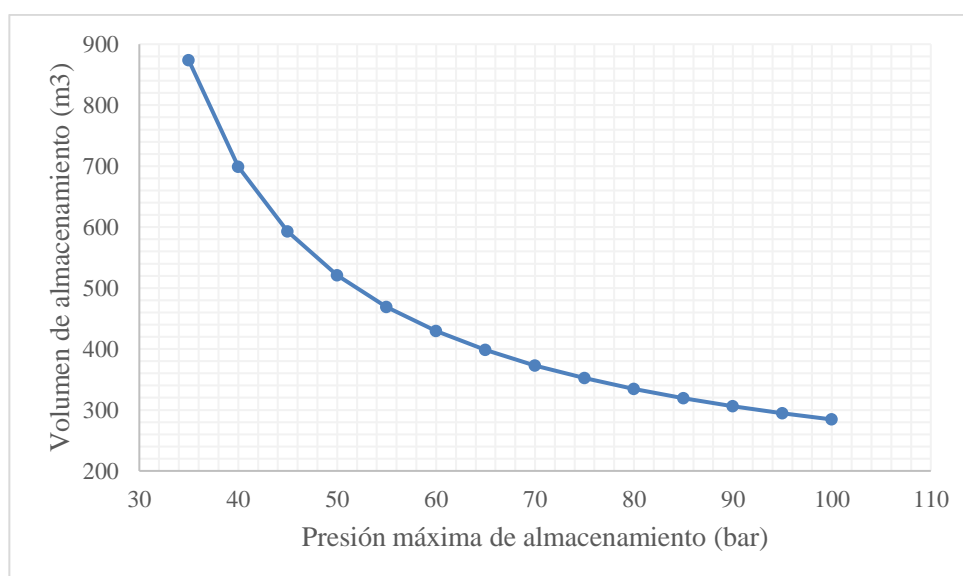


Ilustración 59 Evolución del tamaño del acumulador en función de la presión máxima de almacenamiento. Presión mínima = 20 bar

Analizando los resultados obtenidos podemos afirmar que a medida que aumenta la presión máxima de almacenamiento para una presión mínima dada, el volumen de almacenamiento necesario es menor. Esto se debe a que se consigue una mayor diferencia de presiones entre el inicio y el final de la descarga del acumulador.

También podemos ver como varía el volumen en función del porcentaje de agua al final del periodo de carga, suponiendo que lo demás permanece constante. Teniendo en cuenta que el agua al final del periodo de carga ocupa entre un 50 y un 90 % del volumen total:

Agua al final de la carga (%)	Volumen acumulación total (m^3)	Volumen de un acumulador (m^3)
50	1118	279.6
55	1017	254.2
60	932	233
65	860.3	215.1
70	798.9	199.7
75	745.6	186.4
80	699	174.8
85	657.9	164.5
90	621.3	155.3

Tabla 9 Evolución del tamaño del acumulador a medida que aumenta el % de agua al final de la carga. Presión máxima = 40 bar; Presión mínima = 20 bar

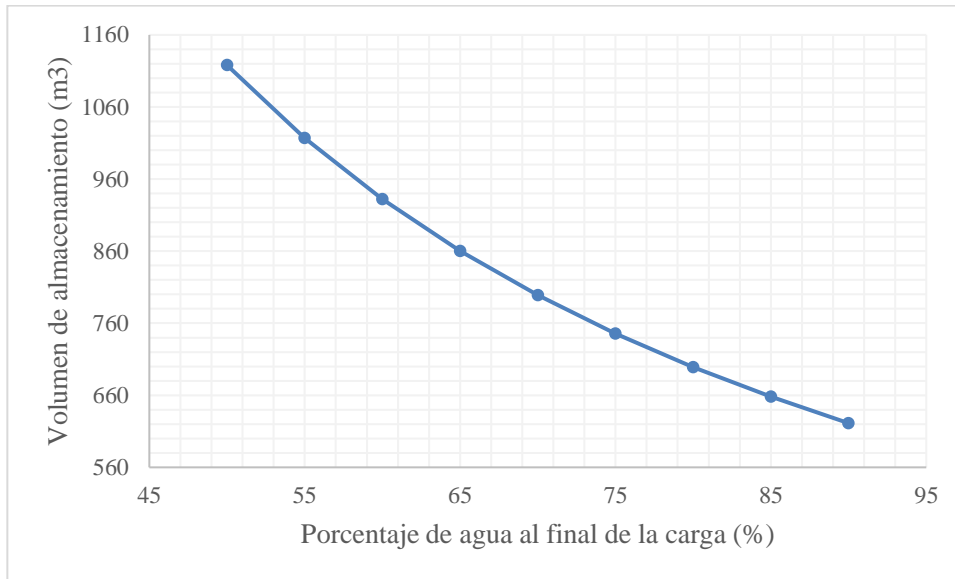


Ilustración 60 Evolución del tamaño del acumulador a medida que aumenta el % de agua al final de la carga. Presión máxima = 40 bar; Presión mínima = 20 bar

A medida que hay más agua al final del periodo de carga, menor es el volumen de almacenamiento.

Para concluir el estudio del sistema de almacenamiento de la PS10, realizo un análisis general partiendo de sus parámetros principales. En la siguiente gráfica puede observarse la cantidad de vapor producida por el acumulador de vapor (eje vertical) en función de las presiones al principio y al final del proceso de descarga (eje vertical).

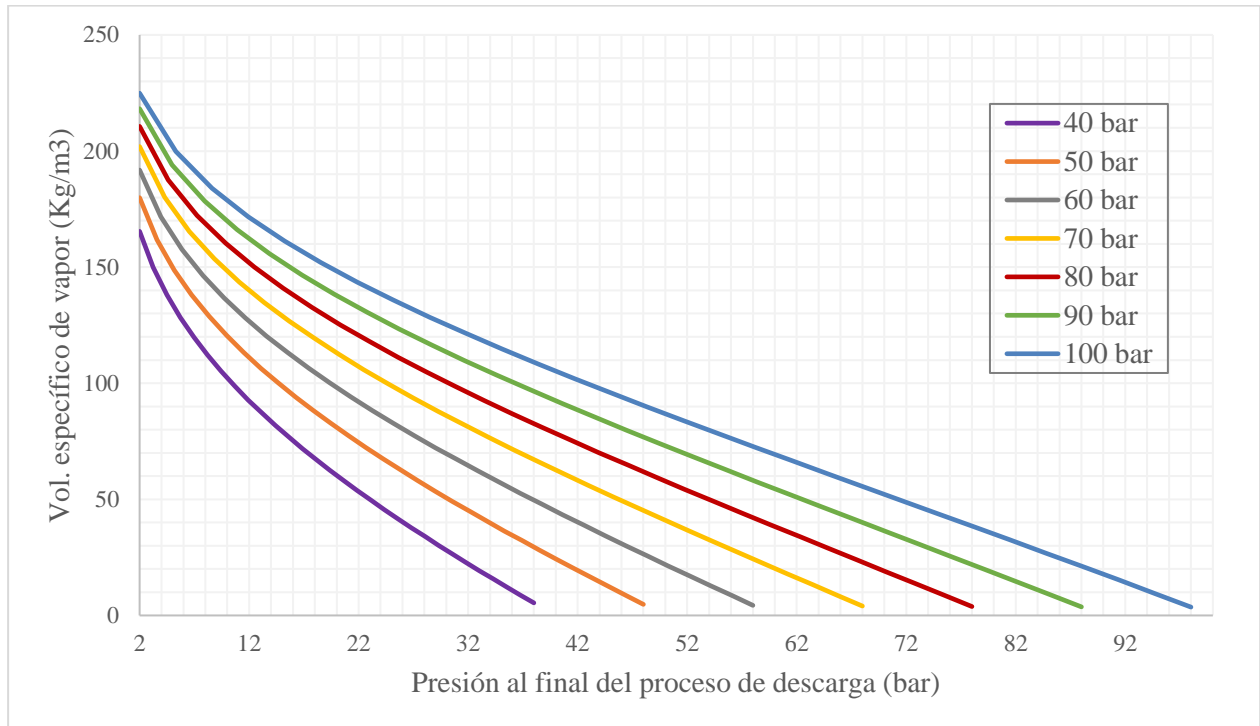


Ilustración 61 Volumen específico de vapor saturado proporcionado por el acumulador para distintas caídas de presión

Vemos que a medida que la diferencia de presiones es mayor, el acumulador de vapor tiende a disminuir de tamaño. Y si trabajamos con presiones altas, el acumulador ha de ser mayor.

5.1.1 Comparación con tanques de sales

Tras haber estudiado el sistema de almacenamiento de vapor de la PS10, podemos proceder a su comparación con el almacenamiento en sales fundidas. Utilizaremos las ecuaciones anteriormente indicadas del cálculo del tamaño de los tanques de sales para ver de qué tamaño tendrían que ser los tanques de sales para proporcionar el mismo caudal de vapor, es decir, para producir la misma potencia eléctrica ($10MW_e$). Utilizo el programa Excel para realizar los cálculos por la simplicidad del modelo.

Teniendo en cuenta los siguientes datos de las sales y las condiciones de cada tanque:

$$C_p = 1,501 \text{ KJ/Kg} \cdot \text{K}$$

$$T_{tc} = 386 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{tf} = 292 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1873 \text{ Kg/m}^3$$

A continuación muestro los resultados obtenidos en una tabla junto a la representación gráfica de los mismos. Calculo el volumen de los tanques de sales variando el tiempo de almacenamiento de

50 minutos (el tiempo de almacenamiento real) a 13 horas y a la vez calculo el volumen de los acumuladores de vapor para ese mismo rango de tiempos de almacenamiento. Además considero un margen de seguridad del 25 %. De esta forma, podremos comparar los tamaños necesarios partiendo de la misma producción de vapor.

Tiempo almacenamiento (minutos)	Tiempo almacenamiento (horas)	Volumen almacenamiento sales (m^3)	Volumen almacenamiento vapor (m^3)
50	0.8	516	699
100	1.7	1032	1398
150	2.5	1548	2097
200	3.3	2064	2796
250	4.2	2580	3495
300	5	3096	4194
350	5.8	3612	4893
400	6.7	4128	5592
450	7.5	4644	6291
500	8.3	5160	6990
550	9.2	5676	7689
600	10	6192	8388
650	10.8	6708	9087
700	11.7	7224	9786
750	12.5	7740	10485
800	13.3	8256	11184

Tabla 10 Comparación almacenamiento en sales y vapor

Potencia eléctrica =10 MWe; Presión máxima = 40 bar; Presión mínima = 20 bar

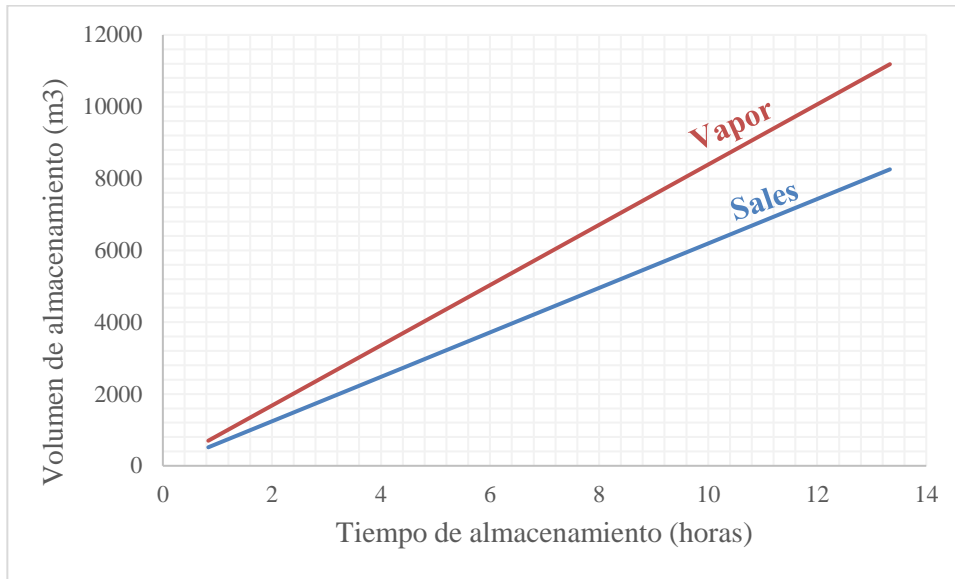


Ilustración 62 Comparación almacenamiento en sales y vapor

Potencia eléctrica =10 MWe; Presión máxima = 40 bar; Presión mínima = 20 bar

Como podemos ver, el volumen de almacenamiento para una misma producción de vapor, o misma potencia eléctrica de generación, es mayor si almacenáramos en vapor y menor si almacenáramos en sales. También puede observarse que a mayor tiempo de almacenamiento, el volumen necesario con vapor crece más rápido que el volumen necesario con sales. El tamaño disminuye un 26 % si almacenáramos en sales fundidas.

5.2 Análisis sistema de almacenamiento de la PS20

Para el análisis de la PS20, en vez de disponer de las presiones como dato de partida, disponemos del caudal de vapor generado por el receptor de 150 t/h. Por lo que nuestro análisis será ver las dimensiones del acumulador de vapor variando la presión de generación. El modelo en EES es tan simple como el que muestro a continuación:

Ecuaciones EES:

```
"Modelo Sistema de Almacenamiento basado en vapor PS20"  
  
"PARÁMETROS DE ENTRADA"  
  
P_e=20*10^6 [We]  
t_a=50 [min]  
Rend_c=0.275  
p_r=120  
p_w=25  
  
q_v=(135*1000)/3600  
  
rho_w=density(Water,x=0,P=p_r)  
  
h_spmax=enthalpy(Water,x=0,P=p_r)  
h_spmin=enthalpy(Water,x=0,P=p_w)  
h_tpmax=enthalpy(Water,x=1,P=p_r)  
h_tpmin=enthalpy(Water,x=1,P=p_w)  
  
D=3  
  
"PARÁMETROS DE SALIDA"  
  
M_v=q_v*t_a*60  
  
M_a=M_v*((0.5*(h_tpmax+h_tpmin)-h_spmax)/(h_spmax-h_spmin))  
  
V_ac=(M_a+M_v)/(0.8*rho_w)  
  
V_1ac=V_ac/2  
  
dif_p=p_r-p_w  
  
Piscina_olimpica=V_ac/(50*25*1.5)  
  
H=1/3*((12*V_1ac)/(pi*D^2)-D)
```

Como no sabemos a las presiones que trabaja el sistema de almacenamiento, realizo un análisis preliminar en el que supongo una presión del receptor de 120 bar y voy variando la presión de almacenamiento, lo que equivale a la presión mínima o la presión del proceso que demanda la carga punta. Considero que la planta consta de dos acumuladores de vapor (como indiqué anteriormente en el estado del arte) y un rendimiento del ciclo de potencia del 27.5 %. Además partiremos también de que la planta produce nominalmente 150 t/h de vapor saturado.

Utilizaré como guía el largo del depósito obtenido para determinar las presiones de funcionamiento más cercanas a la realidad y poder realizar las siguientes simulaciones.

Presión mínima (bar)	Caída de presión (bar)	Volumen de acumulación (m ³)	Volumen de un acumulador (m ³)	Volumen equivalente piscina olímpica	Largo aproximado (m)
55	65	1088	544	0.58	76
50	70	1011	505	0.54	70
45	75	942	471	0.50	66
40	80	880	440	0.47	61
35	85	824	412	0.44	57
30	90	772	386	0.41	54
25	95	723	362	0.39	50
20	100	676	338	0.36	47
15	105	629	315	0.34	43
10	110	580	290	0.31	40
5	115	524	262	0.28	36

Tabla 11 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la caída de presión

Presión máxima = 120 bar

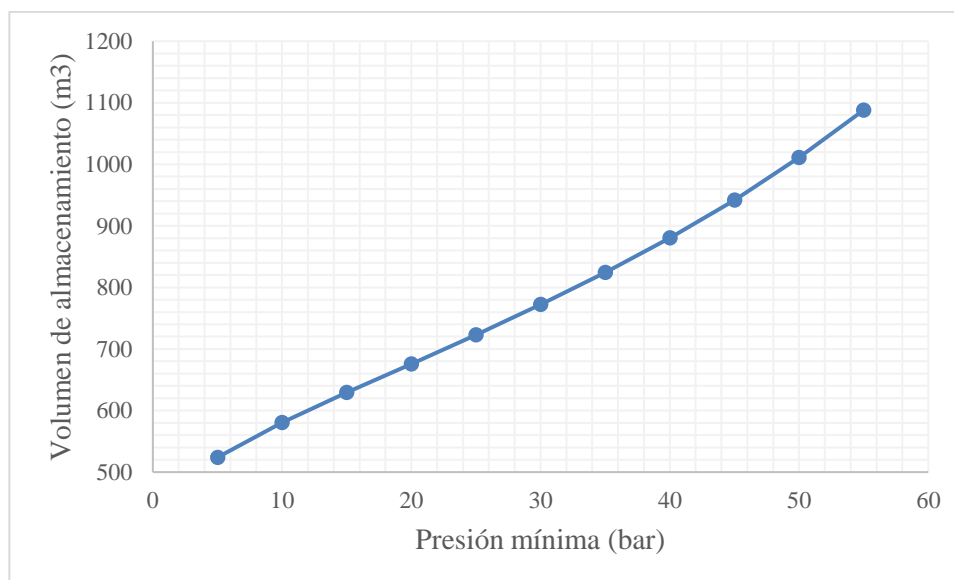


Ilustración 63 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la caída de presión. Presión máxima =120 bar

Tras ver los resultados obtenidos, una caída de presión razonable sería a partir de 90 o 95 bares ya que el largo de cada depósito como mucho puede ser de unos 55 metros. Considero que una caída de 95 bares, lo que equivale a unos 50 metros de largo, es lo más cercano a la realidad.

De este modo el volumen total de acumulación para proporcionar las 150 t/h de vapor sería de 723 m^3 , siendo cada acumulador de 362 m^3 .

A medida que va disminuyendo la caída de presión entre la presión máxima y mínima de almacenamiento, el volumen de almacenamiento necesario es mayor. Por lo que interesa una caída grande para tener que disponer del menor volumen. Esta diferencia de presiones dependerá del diseño de las válvulas que se encuentran a la entrada y salida del vapor en el acumulador. Es decir, cuanta mayor depresión genere la estación reductora de presión a la salida, menor será el volumen de los acumuladores.

Ahora veremos el cambio del volumen de almacenamiento si variamos la presión de generación, teniendo en cuenta los valores anteriores para acercarnos lo máximo posible a la realidad. Considero una presión mínima de 20 bar y la presión de generación estará entre 90 y 180 bar.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Presión máxima (bar)	Caída de presión (bar)	Volumen de acumulación (m^3)	Volumen de un acumulador (m^3)	Volumen equivalente piscina olímpica	Largo aproximado (m)
180	160	549	274	0.29	38
170	150	562	281	0.30	39
160	140	578	289	0.31	40
150	130	597	298	0.32	41
140	120	619	309	0.33	43
130	110	645	322	0.34	45
120	100	676	338	0.36	47
110	90	713	357	0.38	49
100	80	759	380	0.40	53
90	70	817	408	0.44	57

Tabla 12 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la caída de presión
Presión mínima = 20 bar

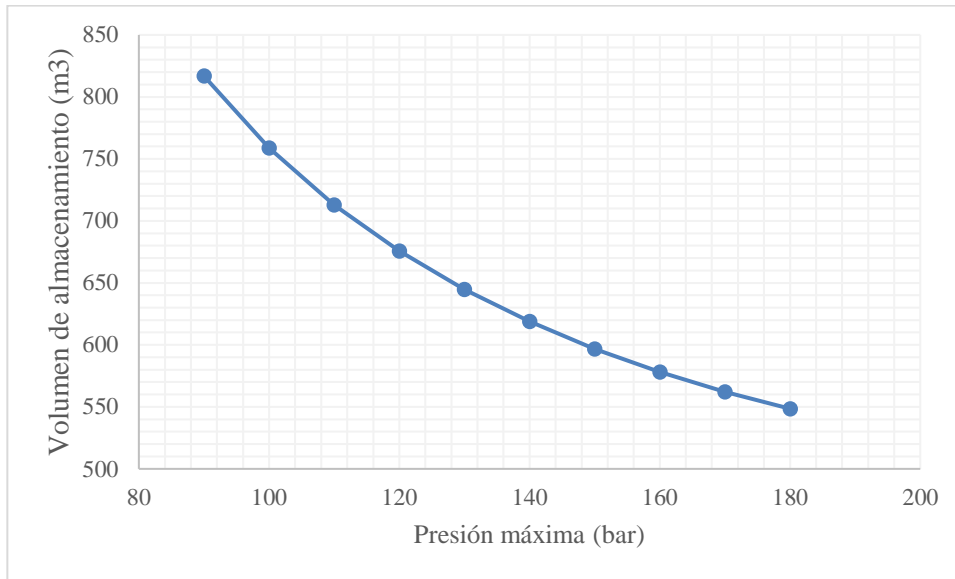


Ilustración 64 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la caída de presión. Presión mínima = 20 bar

Como vemos, ocurre lo mismo que en la PS10, el volumen va disminuyendo con el aumento de la presión de generación. Si generamos vapor a 110 bar y los consumos son a 20 bar, los acumuladores tendrían un tamaño de 357 m^3 y serían de 50 metros de largo.

En definitiva, al ser una planta de más potencia y con el mismo tiempo de almacenamiento, el volumen de almacenamiento es mayor. Los acumuladores son más largos que la PS10, considerando un diámetro similar a la anterior.

También, el incremento de presión provocado por las válvulas que se encuentran a la entrada y salida del acumulador es mayor, siendo este de unos 80 o 95 bares.

5.3 Análisis sistema de almacenamiento de Khi Solar One

En un primer análisis de la planta Khi Solar One partiremos de los datos obtenidos del fabricante. Un caudal de vapor saturado de 105 ton/h a 130 bares. Este caudal es proporcionado por el receptor para su almacenamiento. El modelo que utilizaremos será el mismo que para la planta PS-20 ya que partimos de los mismos datos. Con esto podemos calcular el volumen del acumulador de vapor considerando una caída de presión de la máxima a la mínima de 20 bares en un principio. Consideraremos un tiempo de almacenamiento de 2 horas (120 minutos) y una potencia de 50 MW eléctricos. A continuación incluyo el modelo implementado en EES:

Ecuaciones EES:

```
"Modelo Sistema de Almacenamiento basado en vapor Khi Solar One"

"PARÁMETROS DE ENTRADA"

P_e=50*10^6 [We]
t_a=120 [min]
p_r=130
p_w=90

q_v=(105*1000)/3600

rho_w=density(Water,x=0,P=p_r)

h_spmax=enthalpy(Water, x=0, P=p_r)
h_spmin=enthalpy(Water, x=0, P=p_w)
h_tpmax=enthalpy(Water, x=1, P=p_r)
h_tpmin=enthalpy(Water, x=1, P=p_w)

D=3

"PARÁMETROS DE SALIDA"

M_v=q_v*t_a*60

M_a=M_v*((0.5*(h_tpmax+h_tpmin)-h_spmax)/(h_spmax-h_spmin))

V_ac=(M_a+M_v)/(0.8*rho_w)

V_1ac=V_ac/19

dif_p=p_r-p_w

Piscina_olimpica=V_ac/(50*25*1.5)

H_1=1/3*((12*V_1ac)/(pi*D^2)-D)
```

Como no disponemos de la presión de funcionamiento de la turbina, realizaremos una primera simulación suponiendo la presión de generación de 130 bar y variando la presión de la turbina. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Presión mínima (bar)	Caída de presión (bar)	Volumen de acumulación (m^3)	Volumen de un acumulador (m^3)	Volumen equivalente piscina olímpica	Largo aproximado (m)
100	30	4278	225	2.3	31
95	35	3710	195	2	27
90	40	3281	173	1.7	23
85	45	2945	155	1.6	21
80	50	2673	141	1.4	19
75	55	2448	129	1.3	17
70	60	2259	119	1.2	16
65	65	2096	110	1.1	15
60	70	1955	103	1	14
55	75	1829	96	1	13

Tabla 13 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la presión mínima
Presión máxima =130 bar

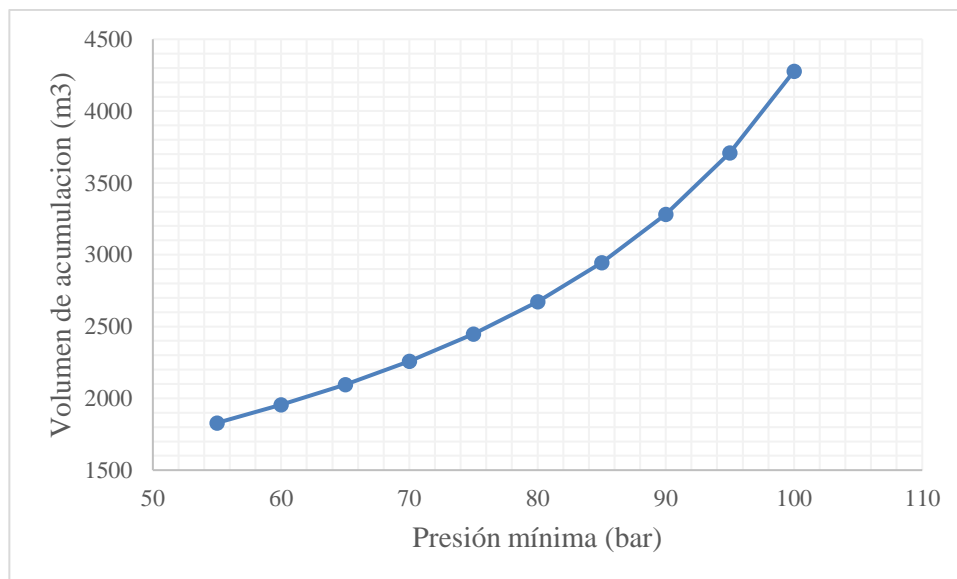


Ilustración 65 Evolución del tamaño del acumulador de vapor en función de la presión mínima. Presión máxima =130 bar

Con este análisis podemos determinar que la presión mínima se encuentra entre 75 y 85 grados ya que cada acumulador ronda los 20 metros de largo.

Considerando una caída de presión de 50 bar, el volumen de acumulación total sería de $2673 m^3$ y cada acumulador de $141 m^3$.

Finalmente y a modo de resumen, incluyo esta tabla con los principales resultados obtenidos tras las simulaciones:

	Potencia eléctrica (MWe)	Presión receptor (bar)	Presión vapor vivo (bar)	Volumen de almacenamiento total (m³)	Volumen acumulador (m³)	Largo aproximado (m)
PS10	10	40	20	699	174.8	23
PS20	20	120	25	723	362	50
Khi Solar One	50	130	80	2673	141	19

6 CONCLUSIONES

Comenzando con el estado del arte de este tipo de sistema de almacenamiento en plantas Termosolares, vemos que únicamente hay tres plantas comerciales que cuentan con almacenamiento basado en vapor. Esto puede deberse a diversas razones pero principalmente es el poco tiempo de almacenamiento que otorga, a pesar de su buen rendimiento ya que es agua y vapor en equilibrio, además de una tecnología que no es novedosa, ni actual.

Posteriormente, al detallar los elementos del sistema, se observa que no van más allá de los que se utilizan en una instalación de vapor convencional, como son las válvulas o purgadores. Lo que podría caracterizar este sistema es el uso de inyectores de vapor para favorecer la mezcla entre el agua y el vapor tras la carga del acumulador.

Fijándonos en los procesos de carga y descarga, es un sistema eficiente que únicamente precisa de una variación de presión para generar vapor saturado en el volumen de agua contenido en el depósito, a diferencia del almacenamiento en sales fundidas que a veces precisa de un equipo intermedio para realizar la carga o descarga. Destacar los cortos tiempos de carga y descarga frente a la tecnología de sales.

Después de describir los elementos principales, se explica muy generalmente las distintas configuraciones en las que podríamos encontrarnos un equipo como este en una industria principalmente, ya que en las plantas solares la configuración suele ser en paralelo, para equilibrar el funcionamiento de la turbina en momentos en los que hay nubes o algún pico de demanda durante cortos periodos de tiempo.

El modelo en el que me he basado, es un modelo que desprecia las pérdidas al ambiente. Esto no conlleva mucho error ya que en la realidad se usan tanques aislados del exterior de gran espesor para evitar estas pérdidas en la medida de lo posible. Por lo que pueden despreciarse.

Y para terminar, al realizar el análisis de las tres plantas, puedo concluir este proyecto con los siguientes puntos referentes al almacenamiento en vapor:

- No se almacena a altas presiones porque los depósitos tendrían que ser de un grosor muy elevado, ya que es un problema tener agua a tanta presión almacenada.
- No se almacena para tiempos elevados ya que las dimensiones del depósito de almacenamiento serían muy grandes y no sería rentable la instalación. Es decir, es un almacenamiento para corto plazo.

- Cuando se trabaja con vapor, se diseña para condiciones por debajo de las nominales. Al generar vapor a 40 bar, la presión del vapor vivo es muy baja, lo que da lugar a un sistema de poca eficiencia.
- Este tipo de sistema de almacenamiento se utiliza para combatir los pequeños transitorios que se puedan producir en una planta solar debido a variaciones bruscas de la irradiación solar, y de este modo, proteger los componentes de la planta (*Steinmann*). El sistema provee estabilidad en transitorios rápidos.
- Con sales, el tamaño de almacenamiento es menor que si almacenáramos en vapor debido a las altas temperaturas que alcanzan las sales. En comparación con los límites operativos del vapor y del agua, que son los que son.

Como conclusión, a pesar de que el almacenamiento en sales conlleve mayores tiempos de almacenamiento, este sistema basado en vapor es muy eficaz para la aplicación que tiene.

7 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Centrales Termosolares del Grado en Ingeniería de la Energía. *Sistemas de almacenamiento y fluidos HTF*. Manuel Antonio Silva Pérez y Javier Pino Lucena. Dto. De Termodinámica.
- *Acumulador de vapor*. Tecnología Energética del Grado en Ingeniería Química. Javier Pino Lucena. Grupo de Termotecnia.
- *Vapor de agua*. Tecnología Energética del Grado en Ingeniería Química. Javier Pino Lucena. Grupo de Termotecnia.
- *Ciclo básico turbina de vapor*. Sistemas de Producción de Potencia. Ricardo Chacartegui
- *15. La electricidad solar térmica. Tan lejos, tan cerca. Guías técnicas de energía y medio ambiente*. Valeriano Ruiz Hernández (Director), Manuel A. Silva Pérez e Isidoro Lillo Bravo. Fundación Gas Natural.
- *Tabla de propiedades del vapor de agua saturado (según la presión)*
- Abengoa solar. <http://www.abengoasolar.com/>
- Abengoa. <http://www.abengoa.es/web/es/index3.html>
- *The Steam and Condensate Loop*. Spirax Sarco.
- *Buffer storage for direct steam generation*. Wolf-Dieter Steinmann, Markus Eck. Elsevier.
- *The efficient use of steam*. Written for the Fuel Efficiency Committee of the Ministry of fuel and power by Oliver Lyle.
- *10 MW Solar Thermal Power Plant for Southern Spain*. Final Technical Progress Report. Solúcar.
- *Cálculo de la Energía Solar*. José Javier García-Badell Lapetra. Dr.Ingeniero
- *Almacenamiento térmico en plantas Termosolares*. Jose M^a Martínez-Val. Grupo de Investigaciones Termoenergéticas. UPM-ETSII. FEE, 29 de Octubre, 2009.
- *Thermal Energy Storage*. Technology Brief. International Renewable Energy Agency
- *Almacenamiento de energía en instalaciones térmicas industriales: análisis del acumulador de vapor*. Ingeniería Industrial. Jorge Rueda Quintanilla. Sevilla, Junio 2014
- *Diseño receptor central con generación directa de vapor*. Madrid GIE Carlos Losada Godoy NREL National Renewable Energy Laboratory
- *Almacenamiento térmico en aplicaciones solares de concentración de alta temperatura*. David Almagro Cabrera. Sevilla, Febrero 2012

- *Situación tecnológica actual de centrales termosolares*. Elena Navarro Moreno. Sevilla, 2016
- Aalborg. Receptor PS20. <http://www.aalborgcsp.dk/proyectos/20-mwe-receptor-de-torre-solar-para-vapor-saturado.aspx>
- CSP World. Planta Yanking Solar. <http://cspworld.org/cspworldmap/yanqing-solar-thermal-power-dahan-tower-plant>
- CSP World. Datos de la PS20. <http://cspworld.org/cspworldmap/ps20>
- Bombas PS20. <http://www.sulzer.com/es/Industries/Power-Generation/Solar/Heliostat-Central-Tower-with-Direct-Steam-Generator>
- Ciclo Rankine. https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_Rankine
- Acumuladores PS20. <https://www.dillinger.de/d/en/products/applications/boilers/references/dillinger-heavy-plate-for-the-first-solar-power-tower-plant-in-south-africa-68527.shtml>
- http://www.abengoasolar.com/export/sites/abengoasolar/resources/pdf/PS20_la_mayor_planta_comercial_termosolar_del_mundo_Infopower_julio2009.pdf
- <http://www.cmigroupe.com/sites/default/files/Documents/CMI%20Thermo%20Solar%20Study%20Case%20Khi%20Solar%20One.pdf>
- http://www.futureenergyweb.es/pdf/articulos/2016-03/FuturEnergy_Mar16_19-22.pdf