

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

Instrumentación y control de sistema de sales fundidas de central termosolar de receptor central

Autor: Guillermo Romero Muñiz

Tutor: José Antonio Rosendo Macías

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

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

Instrumentación y control de sistema de sales fundidas de central termosolar de receptor central

Autor:
Guillermo Romero Muñiz

Tutor:
José Antonio Rosendo Macías
Catedrático

Dep. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Carrera: Instrumentación y control de sistema de sales fundidas de central termosolar de receptor central

Autor: Guillermo Romero Muñiz

Tutor: Jose Antonio Rosendo Macías

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal.

Resumen

El objeto del presente proyecto es doble. Por un lado, se pretende estudiar un tipo de tecnología de producción de energía que está en una fase temprana de su comercialización pero que ya ha pasado la barrera de la experimentación con resultados favorables y que comienza a tomar importancia en la escena de planificación de proyectos a nivel mundial; la generación de electricidad mediante central termosolar con almacenamiento térmico de sales fundidas.

No son comunes las veces en las que se puede decir que nuestro país es pionero en materia de innovación tecnológica. Unido al hecho de que además sea en el campo de las energías renovables, cuya importancia es de sobra conocida, hace que el estudio de esta tecnología sea especialmente atractivo, ya que en este sector se depositan bastantes expectativas en el medio y largo plazo.

Por otro se pretende abordar el estudio del sistema de la planta a describir desde el punto de vista de la instrumentación y control (I&C), disciplina que se aplica a los diferentes sectores industriales, dentro de los cuales hay que tratar y manejar variables relacionadas con los distintos procesos que se llevan a cabo en una planta. Es por tanto una rama interdisciplinar que está en permanente contacto con muchos de los grupos de trabajo involucrados en el desarrollo de un proyecto.

El eje conductor del proyecto será el desarrollo de cada uno de los elementos que componen un lazo de control básico: proceso, transmisor, controlador y elemento final de control. En una planta son necesarios una gran cantidad de lazos de control que tienen como objetivo regular de manera automática las variables del proceso involucradas en la planta.

Para ello, tras explicar las generalidades de la tecnología a tratar, se explicarán los sistemas que componen una planta de potencia de dichas características. A continuación, se analizarán los conceptos más importantes relativos a la medida de variables de proceso; ingeniería de la instrumentación y al diseño y especificación de los elementos finales de control, es decir, las válvulas de control. Finalmente, se procederá al modelado de los diferentes elementos del lazo de control y al diseño del controlador.

Como ejemplo para ilustrar los conceptos que se introducirán, en el presente trabajo se desarrollará un lazo contenidos en el sistema de sales frías de una central termosolar, el cual será modelado y simulado mediante diagramas de bloques (Simulink).

Índice

Resumen	7
Índice	9
Índice de Tablas	11
Índice de Figuras	12
1 Centrales solares termoeléctricas	15
1.1. <i>CCP</i>	16
1.1.1 Sistema HTF	17
1.1.2 Campo solar	18
1.1.3 Valle 1-2	19
1.2. <i>Fresnel</i>	20
1.2.1 Puerto Errado II	22
1.3. <i>Disco parabólico con motor Stirling</i>	23
1.4. <i>Receptor central</i>	24
1.4.1 Campo solar (heliostatos)	24
1.4.2 Receptor	25
1.4.3 Funcionamiento	26
1.4.4 Comparación con CCP	27
1.4.5 Gemasolar	27
1.5. <i>Almacenamiento de energía térmica</i>	28
1.6. <i>Situación actual de las centrales termosolares</i>	33
2 Sistemas de la planta y funcionamiento	40
2.1 <i>Ciclo agua-vapor</i>	40
2.1.1 Agua de alimentación	40
2.1.2 Generación de vapor	41
2.1.3 <i>Bypass</i> de las extracciones de la turbina	41
2.1.4 Turbina de vapor	42
2.1.5 Condensador	42
2.1.6 Diagrama de ciclo	42
2.2 <i>Utilities</i>	44
2.3 <i>Receptor solar</i>	44
2.7 <i>Sistema de sales</i>	47
2.7.1 Funcionamiento, instrumentación y lazos de control del sistema	48
2.7.2 Esquema del sistema	52
2.7.3 Codificación de componentes	53
3 Ingeniería de instrumentación	55
3.1 <i>Generalidades de instrumentos</i>	55
3.1.1 Definiciones	56
3.1.2 Transmisores	58
3.2 <i>Medida de presión</i>	60
3.2.1 Indicadores (manómetros)	60
3.2.2 Transmisores de presión	63

3.3	<i>Medida de temperatura</i>	65
3.3.1	Principio de funcionamiento	65
3.3.2	Tipos de termopar	67
3.3.3	Partes constructivas y montaje	69
3.4	<i>Medida de caudal</i>	71
3.4.1	Medición con placa orificio	71
3.4.2	Medición con placa orificio	74
3.5	<i>Medida de nivel</i>	77
4	Válvulas de control	80
4.1	<i>Partes constructivas</i>	80
4.2	<i>Especificación de válvulas de control</i>	82
4.2.1	Tipo de válvula	83
4.2.2	Cuerpo y tapa	84
4.2.3	Internos (trim)	85
4.2.4	Característica de la válvula	85
4.2.5	Tipo de acción	88
4.2.6	Actuador y accesorios	89
4.2.7	Cálculo de C_v	89
4.2.8	Línea de balanceo	91
4.2.9	Línea de sales	92
4.3	<i>Fenómenos físicos</i>	93
4.3.1	Cavitación	93
4.3.2	<i>Flashing</i>	95
4.3.3	Ruido	96
5	Lazo de control	98
5.1	<i>Modelado del proceso</i>	98
5.2	<i>Función de transferencia de la válvula</i>	103
5.3	<i>Función de transferencia del transmisor</i>	104
5.4	<i>Diseño y sintonización del controlador</i>	106
6	Conclusiones	111
6.1	<i>Documentación</i>	111
6.2	<i>Conclusiones</i>	112
	Referencias	114
	Anexo I. Dimensionado de placa orificio	118
	Anexo II. Dimensionado de válvula	122
	<i>Ecuaciones de dimensionado para fluidos incompresibles</i>	122
	<i>Ecuaciones de dimensionado para fluidos compresibles</i>	133
	Anexo III. Valores numéricos de parámetros del modelo	139
	Anexo IV. Planos	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros principales de Gemasolar. Fuente: SolarPaces.	28
Tabla 2. Características de materiales para almacenamiento de calor sensible. Fuente:	31
Tabla 3. Proyectos termosolares ejecutados a nivel global. Fuente: Protermo Solar.	34
Tabla 4. Proyectos termosolares actualmente en construcción. Fuente: ProtermoSolar	35
Tabla 5. Proyectos termosolares ejecutados y en ejecución en España. Fuente: Protermo Solar.	38
Tabla 6. Instrumentación de las bombas del receptor.	49
Tabla 7. Instrumentación de bombas de atemperación.	49
Tabla 8. Codificación ISA empleada en el proyecto.	53
Tabla 9. Simbología P&ID.	54
Tabla 10. Tipos de termopar.	68
Tabla 11. Límites de error estándar para termopares.	69
Tabla 12. Especificaciones para clase VI de fugas.	89
Tabla 13. Efectos sobre el lazo de control de las acciones de control.	108
Tabla 14. Ecuaciones de Cv.	122
Tabla 15. Valores típicos de F_L , x_T y F_d .	124
Tabla 16. Valores de constantes numéricas.	126
Tabla 17. Ecuaciones del anexo F.	129
Tabla 18. Ecuaciones de coeficiente de flujo para fluidos compresibles.	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de central termosolar. Fuente: Agencia Andaluza de la Energía.	16
Figura 2. Esquema de colector cilindro-parabólico. Fuente: Torresolenergy.	17
Figura 3. Colector cilindro-parabólico. Fuente: Torresol Energy.	18
Figura 4. Medición de temperatura en HTF y detalle del interruptor de posición de colector.	19
Figura 5. Vista aérea de Valle 1-2. Fuente: Torresol Energy	19
Figura 6. Esquema de reflector y tubo absorbedor Fresnel. Fuente: Solarpraxis.	20
Figura 7. Línea de campo solar de espejos Fresnel. Fuente: i+denenergía.	21
Figura 8. Vista de la planta Puerto Errado II. Fuente: Renewables Made in Germany.	22
Figura 9. Esquema de unidad productora.	23
Figura 10. Helisotato, sistema de seguimiento y campo solar (Gemasolar). Fuente: Abengoa	25
Figura 11. Esquema de central termosolar de torre.	26
Figura 12. Receptor y campo solar de Gemasolar. Fuente: Torresol Energy.	28
Figura 13. Sistemas principales.	29
Figura 14. Capacidad de almacenamiento de calor sensible en medios líquidos.	31
Figura 15. Esquema de almacenamiento indirecto. Fuente: CIEMAT.	32
Figura 16. Esquema de almacenamiento directo. Fuente: CIEMAT.	32
Figura 17. Centrales termosolares en la provincia de Sevilla. Fuente: Protermo Solar	39
Figura 18. Diagrama ciclo agua-vapor	43
Figura 19. Esquema del receptor.	44
Figura 20. Situación <i>stand-by</i> .	45
Figura 21. Precalentamiento del receptor.	45
Figura 22. Modo normal de operación.	46
Figura 23. Situación inicial.	47
Figura 24. Detalle de estructura de bomba de sales fundidas.	50
Figura 25. Detalle e instalación de resistencias en tanques.	51
Figura 26. Esquema del sistema de sales.	52
Figura 27. Esquema de transmisor de presión diferencial.	56
Figura 28. Definiciones asociadas a instrumentación (ejemplo de T ^a).	58
Figura 29. Esquemas de funcionamiento de transmisores.	59
Figura 30. Escalas de presiones. Fuente: ISA	60
Figura 31. Funcionamiento manómetro Bourdon tipo C. Fuente: [22]	61
Figura 32. Accesorios para manómetros: sifón, protector sobrepresiones y sello de diafragma.	62
Figura 33. Manómetro para HTF. Fuente: B-Valve.	62

Figura 34. Esquema de transmisor capacitivo y señal de salida. Fuente: Rosemount.	63
Figura 35. Transmisor de presión con manifold. Fuente: Emerson.	64
Figura 36. Transmisor de presión con conexión remota. Fuente: Emerson.	64
Figura 37. Esquema de efecto Seebeck	65
Figura 38. Esquema de efecto Peltier	66
Figura 39. Esquema de termopar	67
Figura 40. Curvas de voltaje en función de T^a .	68
Figura 41. Esquema de conexionado de termopares.	69
Figura 42. Elemento primario soldado (catálogo e instalación).	70
Figura 43. Transmisor de temperatura (catálogo e instalado)	70
Figura 44. Tipos de placa orificio. Fuente: ISA.	71
Figura 45. Esquema de placa orificio. Fuente: ISA.	72
Figura 46. Montaje para medición en gases secos.	73
Figura 47. Caudalímetro con placa orificio montaje directo. Fuente: B-Valve.	74
Figura 48. Principio de funcionamiento de medidor Doppler	75
Figura 49. Funcionamiento de medidor <i>transit-time</i> .	76
Figura 50. Montaje de transductor y caudalímetro ultrasónico para gases. Fuente: [32] y B-Valve.	76
Figura 51. Señales en un sistema radar FMCW.	77
Figura 52. Diferentes formas de antena (parabólica, tubo tranquilizador, con sello de proceso y varilla)	78
Figura 53. Aspectos constructivos de medidor por radar e instalación. Fuente: Rosemount.	79
Figura 54. Válvula de control y vista explosionada. Fuente: B-Valve/Hora.	81
Figura 55. Accesorios de una válvula de control. Fuente: Hora.	82
Figura 56. Partes de la especificación de la válvula	83
Figura 57. Clasificación de válvulas empleadas y esquema de obturadores.	84
Figura 58. Tipos de conexiones soldadas.	85
Figura 59. Característica de caudal lineal y ganancia.	86
Figura 60. Característica y ganancia isoporcentual.	87
Figura 61. Relación $rating/C_v$. Fuente: Master I&C ISA.	90
Figura 62. Válvula específica para aplicaciones en sales. Fuente: Flowserve.	93
Figura 63. Derrame subcrítico (situación normal). Fuente: Seminario Hora.	93
Figura 64. Cavitación. Fuente: Seminario Hora.	94
Figura 65. Efecto de un diseño multi-etapa o cascada. Fuente: Hora.	94
Figura 66. Interno dañado por operación en sales. Fuente: Flowserve.	95
Figura 67. Flashing y efectos adversos sobre los internos. Fuente: Seminario HORA.	96
Figura 68. Conductos laberínticos entre obturador y asiento y difusores.	97
Figura 69. Esquema típico de lazo de control.	98
Figura 70. Esquema del lazo de control	99
Figura 71. Elementos y bloques de un transmisor electrónico. Fuente: [47].	105
Figura 72. Bloques de transmisor electrónico. Fuente: [47].	105

Figura 73. Esquema y simulación de lazo de control.	106
Figura 74. Error en régimen permanente en sistema de primer orden con controlador proporcional.	107
Figura 75. Interfaz de sintonización de controlador.	108
Figura 76. Parámetros del controlador.	109
Figura 77. Respuesta temporal del sistema con controlador PID.	110
Figura 78. Factor F_F frente a relación P_V/P_C .	123
Figura 79. Diagrama de flujo para fluidos compresibles.	137

1 CENTRALES SOLARES TERMOELÉCTRICAS

EL objetivo de este capítulo es exponer las características de la tecnología que emplea el sistema bajo estudio de cara a establecer un marco en el que englobar la descripción de equipos y sistemas que se involucran en el mismo y que serán tratados en mayor profundidad a lo largo del proyecto.

Para ello, se comenzará describiendo brevemente las opciones de generación termosolar a escala comercial con las que actualmente se trabaja en el mercado, de las cuales, algunas se encuentran en estadios más avanzados de desarrollo que otras.

Las tecnologías de producción de energía eléctrica están a la orden del día en las empresas de ingeniería de proyectos a todos sus niveles, tanto en ingeniería como en empresas de EPC (construcción, puesta en marcha y comisionado), no es de extrañar, por tanto, que el I+D de este tipo de empresas se centre en este campo para desarrollar el “*know-how*” necesario para que se les adjudiquen concesiones de proyectos de este tipo de plantas.

Existen diversas tecnologías basadas en la radiación solar como fuente primaria. A grandes rasgos, la radiación solar se puede aprovechar fundamentalmente de dos formas; directamente mediante placas fotovoltaicas, que transforman radiación solar en electricidad, o bien mediante la transformación de la radiación solar en energía térmica para, posteriormente, transformarla en electricidad. Simplificando, la idea consiste en concentrar los rayos del sol para lograr elevadas temperaturas con las que calentar agua y obtener vapor para así poder operar un ciclo de potencia.

De las posibilidades que se pueden plantear para esta segunda opción existen a su vez dos subgrupos:

- Las que concentran la radiación a lo largo de una línea, dentro de las cuales las posibilidades son el empleo de espejos fresnel o concentrador cilindro-parabólico (en adelante CCP).
- Las que concentran la radiación solar en un punto, en las que, con posibilidad de una mayor concentración y de realizar movimientos en dos ejes, se encuentran las de torre central y las de disco parabólico con motor Stirling.

De estos grupos descritos, y mediante mezcla o hibridación de estas tecnologías con otras más tradicionales surgen nueve posibilidades que a continuación se enumeran [1]:

- Centrales de concentrador de cilindro parabólico.
- Centrales CCP con almacenamiento térmico en forma de sales inorgánicas.
- Centrales de concentrador lineal fresnel.
- Centrales de receptor central con generación directa de vapor.
- Centrales de receptor central con sales inorgánicas fundidas.
- Centrales de discos parabólicos equipados con motor Stirling.
- Centrales híbridas con caldera de gas.
- Centrales CCP con hibridación con biomasa.
- Centrales CCP hibridadas con centrales de ciclo combinado.

De estas posibilidades, sin duda, la que posee un mayor grado de madurez es la que emplea concentradores cilindro-parabólicos al ser la que acumula un mayor número de horas de operación.

El resto de tecnologías han superado la barrera de la investigación, con plantas construidas y operativas que superan la decena de MW (salvo la tecnología de discos parabólicos), por lo que se puede considerar que todas son aptas para su implantación comercial a gran escala.

Sea cual sea el tipo de tecnología que se plantee para la explotación de la planta, en la Figura 1 se muestra el esquema básico que sigue el proceso de obtención de energía en cualquier central termosolar y los principales elementos que intervienen en el proceso.

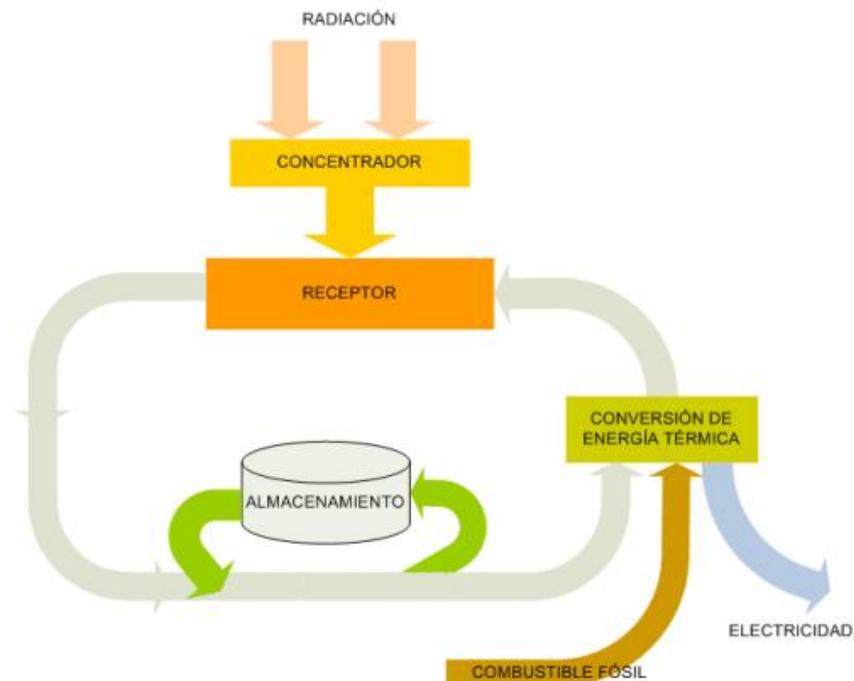


Figura 1. Esquema general de central termosolar. Fuente: Agencia Andaluza de la Energía.

Fundamentalmente, la diferencia entre diversas tecnologías, como se verá a lo largo del capítulo, reside en el modo en el que se realiza la recepción y concentración de la radiación solar, es decir, el modo en el que se plantea el denominado “campo solar”.

Dentro de una misma tecnología, existen opciones adicionales que pueden ser introducidas, de entre las que destaca la posibilidad de almacenamiento térmico o la hibridación con otro tipo de tecnología (convencional o no) de producción de potencia. En este último aspecto se pueden citar el ciclo combinado y la biomasa.

En lo que respecta al ciclo agua-vapor que se emplea, sufre pocas modificaciones de una planta a otra, ya que se emplean los mismos equipos y sistemas.

En este capítulo introductorio, se exponen brevemente los conceptos que envuelven a las cuatro opciones principales de generación; concentrador de cilindro parabólico, concentrador lineal fresnel, disco parabólico con motor Stirling y receptor central, excluyendo la parte del ciclo de potencia, que se tratará en profundidad más adelante. Además, se comentarán algunos aspectos acerca de la posibilidad de almacenamiento térmico enfocado a presentar en profundidad la tecnología de receptor central con almacenamiento en sales fundidas sobre la que se centra el trabajo.

1.1. CCP

El principio de funcionamiento de esta tecnología es la concentración solar a lo largo de una línea con una longitud comprendida entre 600 y 800 metros, a través de la cual un fluido, denominado caloportador, es el encargado de transportar la energía captada por los concentradores hasta el bloque de potencia. Dicho fluido entra por un extremo de la línea con una temperatura y velocidad determinadas y sale por el otro, tras haber incrementado su temperatura. Esto se consigue procurando que el sol incida lo más perpendicular posible a la superficie de captación, concentrando los rayos solares en unos tubos situados en la línea focal de los receptores.

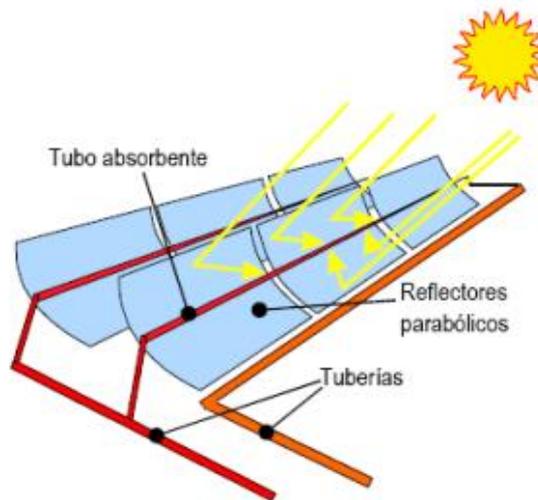


Figura 2. Esquema de colector cilindro-parabólico. Fuente: Torresolenergy.

Se explican a continuación los dos sistemas más característicos de las centrales CCP; el sistema de HTF y el campo solar.

1.1.1 Sistema HTF

Al fluido caloportador se le suele denominar HTF (*Heat Transfer Fluid*). La elección de un tipo de fluido u otro depende de varios factores. El sistema HTF que se utilice determina el rango de temperaturas de operación del campo solar y, consecuentemente, el rendimiento máximo que se puede obtener en el ciclo de potencia.

El rango óptimo de temperatura de operación en este tipo de colectores va de 150 a 400°C. A mayores temperaturas, las pérdidas térmicas serían demasiado altas y reducirían el rendimiento y para temperaturas menores de 150°C existen otro tipo de colectores más económicos, como los de tubo de vacío.

A menos de 175°C el empleo de agua desmineralizada como fluido caloportador no da excesivos problemas al no haber una presión de trabajo muy grande. Para aplicaciones en las que se desean obtener mayores temperaturas (200-400°C) es necesario, o al menos recomendable, el empleo de fluidos sintéticos. Esto es debido a que, si se emplea agua como fluido caloportador, para evitar que cambie de estado, es necesario mantener su presión por encima de la presión de saturación. Esta presión, corresponde a la que alcanza el fluido en los colectores solares, con lo que las tuberías trabajarían a altas presiones, incurriendo de este modo en gastos adicionales. Con el empleo de aceite térmico, este problema queda resuelto, ya que su presión de vapor, a igual temperatura, es más baja que la del agua, por lo que se puede operar a menor presión simplificando la instalación y las medidas de seguridad.

De las opciones posibles, los fluidos orgánicos sintéticos son la más recomendable. El que normalmente se emplea en las actuales centrales termosolares CCP, por su compromiso entre coste y prestaciones, es una mezcla eutéctica de dos hidrocarburos aromáticos derivados del benceno: el bifenilo (73,5%) y el difenil éter (26,5%). Hay que tener en cuenta las siguientes limitaciones [2]:

- Congela a los 12°C por lo que es necesario mantener todo el circuito a una temperatura mayor que esta para evitar problemas.
- Si la temperatura supera los 420°C, se degrada. Las temperaturas que pueden alcanzar los tubos absorbentes se mueven en el entorno de 500°C, por lo que hay que tener precaución en dos sentidos:
 - Controlar que la temperatura no supere nunca la de degradación del fluido mediante un caudal mínimo que asegure que no se alcanza esta temperatura. Además, este fluido tiene riesgo de explosión, por lo que es doblemente importante este control de temperatura.
 - Las reacciones de degradación propias de los hidrocarburos pueden dar lugar a otros hidrocarburos que modifiquen las propiedades del fluido, por lo que se ha de disponer de un sistema de eliminación de estos productos de degradación mediante un sistema de ullage.

1.1.2 Campo solar

En cualquier tipo de central, el lugar donde se recoge la radiación y se transfiere en forma de calor al fluido caloportador se denomina campo solar. Los componentes de cada módulo del campo solar de este tipo de central son los siguientes (Figura 3):

- Reflector cilindro-parabólico. Su misión es la de elevar la temperatura del fluido caloportador que circula por dentro del tubo absorbedor. Esto se lleva a cabo reflejando la luz solar y concentrándola en el tubo absorbedor.
- Tubo absorbedor. Está formado por dos tubos concéntricos, uno interior metálico, por el cual circula el fluido caloportador y otro exterior de vidrio. Ambos tubos están separados por una capa de vacío.
- Sistema de seguimiento. Como los sistemas de concentración solo aprovechan la radiación directa, para asegurar que el sol incida de forma lo más perpendicular posible a la superficie de captación, se instala este tipo de sistema. Además, ante condiciones climáticas adversas, este tipo de sistema actúa como protección. Existen dos tipos de configuraciones: este-oeste y norte-sur.
 - Este-oeste: con este sistema las pérdidas aumentan durante la salida y la puesta del sol. En cuanto a época del año, este tipo de seguimiento es más consistente a lo largo del año.
 - Norte-sur: este sistema acentúa las pérdidas a medio día y en verano recoge mucha radiación y muy poca en invierno.
- Estructura metálica. Mantiene al resto de elementos unidos de forma estable.

Los módulos se agrupan entre sí para formar colectores, que se mueven conjuntamente y los colectores se agrupan en lazos. El campo solar lo componen, por tanto, los lazos que trabajan en paralelo.



Figura 3. Colector cilindro-parabólico. Fuente: Torresol Energy.

Desde el punto de vista de la instrumentación, los elementos más destacables en el campo solar son:

- Válvulas de control de HTF, las cuales suelen situarse en la entrada de cada lazo para regular la circulación de HTF por el mismo.
- En cada módulo, el sistema de seguimiento del colector, el final de carrera (interruptor de posición que marca la posición de máxima inclinación del espejo) y el transmisor de temperatura, el cual está preparado para trabajar a muy alta temperatura.

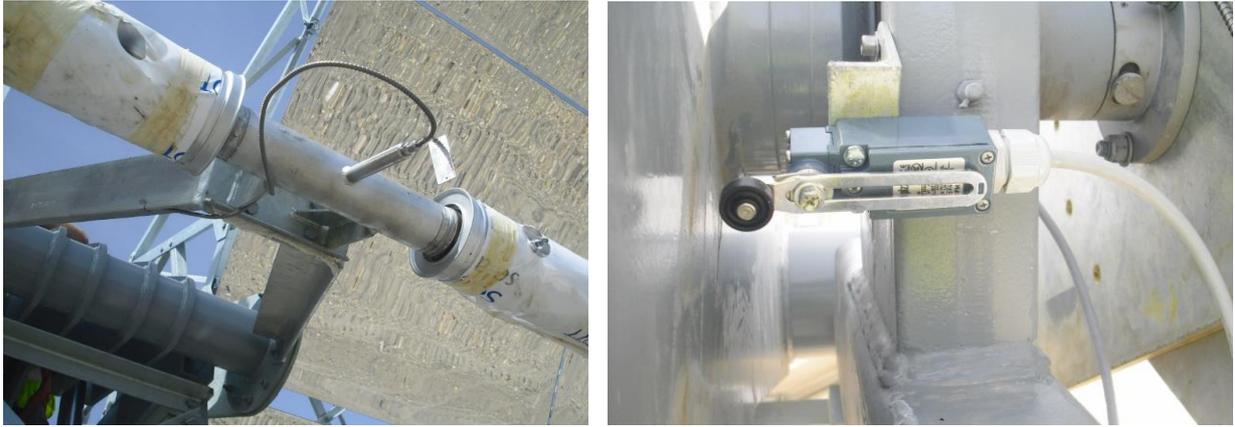


Figura 4. Medición de temperatura en HTF y detalle del interruptor de posición de colector.

1.1.3 Valle 1-2

Para ilustrar el tipo de tecnología descrita, se tomará como ejemplo las centrales Valle 1 y 2, situadas en San José del Valle (Cádiz, España), propiedad de Arcosol 50 y Termesol 50 respectivamente. Estas centrales constituyeron un hito al ser la mayor construcción secuencial de dos plantas termosolares realizada en España hasta la fecha.

El campo solar de cada una de estas plantas gemelas (Figura 5) lo forman 510000 m² de captadores cilindro-parabólicos y más de 1500 km de colectores de última generación (fabricados por Sener) permitiendo tener una potencia nominal de turbina entre las dos plantas de 100 MW, lo cual se traduce en una producción eléctrica neta esperada de 160 GWh al año. Estas centrales utilizan aceite térmico como HTF y poseen una capacidad total de almacenamiento de 14 h, teniéndose así un mayor grado de gestionabilidad [3].



Figura 5. Vista aérea de Valle 1-2. Fuente: Torresol Energy

1.2. Fresnel

Este tipo de tecnología surge como alternativa de menor coste a las CCP, destacando además por su sencillez constructiva. Al igual que las centrales de colector cilindro-parabólico, se basan en la concentración solar a lo largo de un tubo absorbedor situado a varios metros de altura obteniéndose una relación de concentración de 20:1.

Para la construcción de los reflectores, se emplean espejos de vidrio plano, por lo que la materia prima es muy barata. Los espejos de las centrales CCP, debido a su forma, son un 15% más eficientes que los de las centrales con tecnología Fresnel, no obstante, el ahorro de costes de los materiales unido a la simplicidad del funcionamiento hacen que la reducción de rendimiento se vea compensada con la reducción de costes en materiales. Una central con colectores cilindro-parabólico cuesta en torno a un tercio más que una Fresnel, a igualdad de potencia instalada.

Como se aprecia en la Figura 6, el fundamento de esta tecnología muy similar a la CCP, ya que trata de imitarla, pero de una forma más simple y económica.

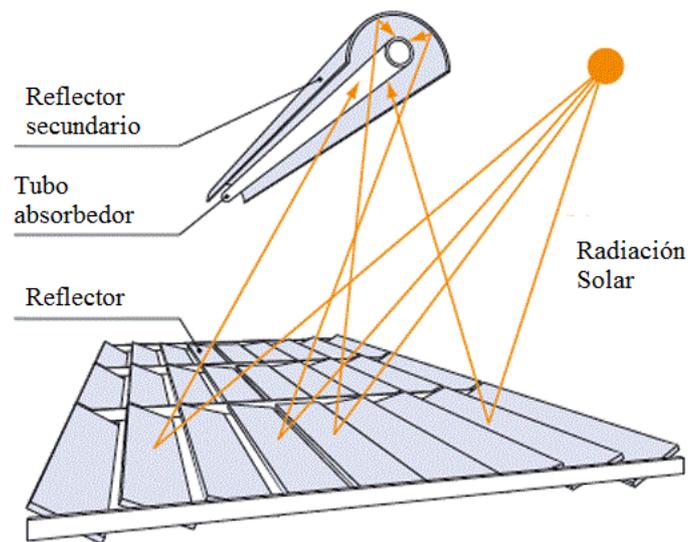


Figura 6. Esquema de reflector y tubo absorbedor Fresnel. Fuente: Solarpraxis.

Las plantas basadas en esta tecnología consisten fundamentalmente en un campo de espejos primarios, un espejo secundario y un tubo absorbedor. El campo primario se compone de una serie de filas de espejos planos a un metro de altura sobre el terreno. Cada fila tiene 60 cm de ancho y una longitud comprendida entre 600 y 900 m. Los rayos del sol se reflejan en los espejos planos los cuales a su vez los reflejan en el tubo absorbedor situado a 8 m por encima del nivel donde se halla el campo de espejos primario. El tubo absorbedor es el responsable de la transformación de radiación solar en energía térmica. La función del reflector secundario es la de reconducir los rayos de sol que tras rebotar en los espejos primarios no han incidido directamente sobre el tubo absorbedor. En la Figura 7 se muestra una línea de colectores de este tipo.

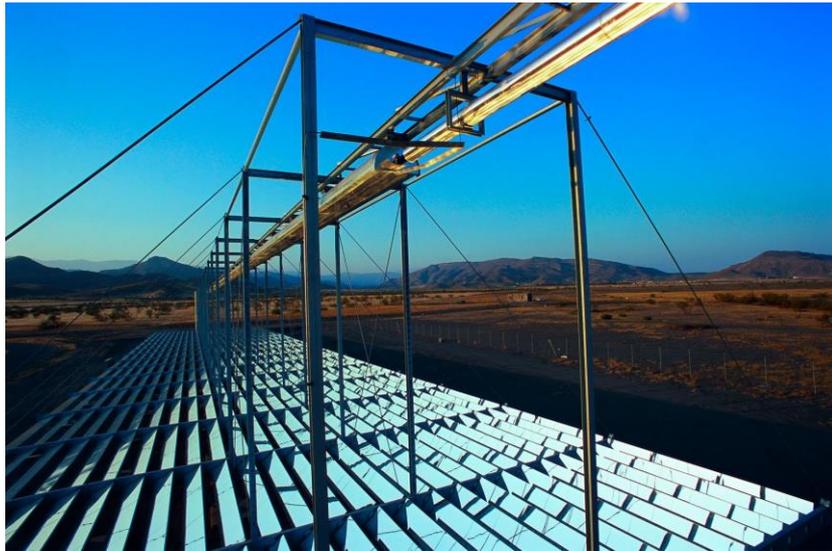


Figura 7. Línea de campo solar de espejos Fresnel. Fuente: i+denergía.

El hecho de que los espejos sean planos y no curvos disminuyen el coste un 30% con respecto a los cilindro-parabólicos. Además, las diferentes líneas de espejos pueden colocarse muy cerca unas de otras, logrando un mayor porcentaje de aprovechamiento del espacio con respecto a las CCP, las cuales requieren separación entre lazos para evitar sombras y permitir el acceso para mantenimiento (estos espacios de separación suponen 2/3 partes del terreno del campo solar).

La simplicidad del sistema se ve reflejada también en la facilidad para realizar la automatización del proceso de seguimiento y limpieza del campo solar.

Las filas de espejos se controlan con una serie de motores eléctricos que realizan el seguimiento del movimiento del sol a lo largo del día en un solo eje, por lo que no se realiza seguimiento estacional y la producción variará a lo largo del año. Un solo motor puede realizar el seguimiento de todos los espejos colocados a lo largo de 100 m, lo cual supone un nuevo ahorro en desembolso inicial.

La limpieza se realiza mediante un sistema compuesto de un motor con cepillos rotativos que se desplaza por toda la línea de espejos, aprovechando nuevamente la ventaja de que estos sean planos, sin necesidad de emplear agua o personal extra para la realización de dicho proceso, pudiendo automatizarse por completo.

El tubo absorbedor también presenta menor coste que el de las centrales CCP. Las temperaturas que se alcanzan son menores, por lo que no es necesario tener una cubierta de cristal ni realizar el vacío. Por el tubo absorbedor circula agua, la cual se evapora debido a la radiación solar recibida encontrándose a la entrada al bloque de potencia a 270°C y unos 55 bares de presión [4].

Hasta ahora parece que la tecnología Fresnel ofrece numerosas ventajas con respecto a las centrales CCP, sin embargo, esta última sigue teniendo una serie de ventajas con respecto a las centrales Fresnel en cuanto a rendimiento del ciclo que hacen que sea la opción preferida en cuanto a concentración solar lineal.

A continuación, se exponen las principales ventajas de las CCP con respecto a las Fresnel [1].

- La relación de concentración de las centrales CCP rondan el 80:1 mientras que las Fresnel se sitúan en el 20:1.
- Los niveles de presión en las plantas Fresnel son más bajos. Las CCP alimentan al cuerpo de alta de la turbina a unos 100 bares, mientras que en las Fresnel la presión de salida de los colectores es de unos 55 bares, reduciéndose a 35 bares en el calderín de vapor siendo la de entrada a la turbina. Esta reducción de presión implica una reducción en el rendimiento del ciclo que unida a la pérdida de rendimiento óptico en campo solar disminuyen sensiblemente el rendimiento global de las plantas.
- La temperatura del vapor también es más baja; en torno a los 240°C frente a los 380°C que se alcanzan en las centrales CCP.
- Las centrales CCP tienen un recalentamiento intermedio entre el cuerpo de alta y de baja de la turbina por

lo que se incrementa el rendimiento del ciclo. Al trabajar con vapor saturado en casi todo momento, en las turbinas de las centrales Fresnel se produce condensación desde el primer momento que comienza la expansión. Esto implica que las turbinas serán de pocas etapas, con bajo rendimiento, con necesidad de materiales especiales entre álabes y una mayor necesidad de revisiones.

- Por todo lo comentado, en general los rendimientos totales de este tipo de planta son significativamente menores. Frente al 39% que se alcanza en las CCP, en Fresnel se sitúan en torno al 27%.

Y a modo de resumen se enumeran las ventajas de las centrales Fresnel:

- Las centrales Fresnel son mucho más baratas en inversión inicial y emplean un concepto más sencillo. No se emplean espejos curvos, mucho más caros y difíciles de limpiar y operar.
- No se emplea HTF, el cual requiere un cuidado y consideraciones especiales, así como una serie de problemas de cara a la instrumentación y los equipos.
- El tubo absorbedor no requiere cubierta de cristal y por lo tanto no se requiere vacío entre el tubo metálico y la cubierta de vidrio, siendo por tanto más simple y barato.

1.2.1 Puerto Errado II

El proyecto que servirá de ejemplo para esta otra opción es Puerto Errado II. Esta planta construida por Novatec y situada en Calasparra (Murcia) hasta hace poco era la mayor del mundo en sus características [5].

Comenzó su operación en marzo de 2012, siendo inaugurada oficialmente en octubre de ese mismo año. Posee un área total de 70 hectáreas sumando el campo solar y el bloque de potencia. La turbina, que posee una capacidad de 30 MW, tiene unas condiciones de operación de presión y temperatura de 55 bares y 270°C respectivamente. El ciclo emplea una refrigeración seca mediante aire y aerocondensadores a la salida de eyectores de la turbina. Todo ello se ve reflejado en una generación esperada de 49 GWh/año. Dicha estimación se realiza en base a la radiación esperada, los consumidores de la red y la eficiencia de los equipos

El campo solar está compuesto por 28 líneas de 940 metros de longitud cada una con una anchura de 16 metros, lo cual supone un total de 302,000 m². La temperatura de entrada al campo solar es de 140°C y la de salida 270°C [6].



Figura 8. Vista de la planta Puerto Errado II. Fuente: Renewables Made in Germany.

Una de las peculiaridades más interesantes que posee esta planta es la capacidad de almacenamiento que posee, no tanto por su capacidad (0,5 h) sino por el sistema que emplea: *Thermocline*.

Este sistema utiliza un solo depósito que contiene el medio de almacenamiento con un gradiente térmico vertical, con las temperaturas altas en la parte superior del depósito y las temperaturas bajas en la parte inferior. Esta estratificación térmica que se debe a la densidad más alta del fluido menos caliente separa los dos potenciales

de temperatura.

Además del fluido, el depósito contiene también un relleno con material de bajo coste que conlleva la mayor parte de la capacidad térmica del sistema, evita la mezcla convectiva y reduce la cantidad del fluido caloportador que suele ser más costoso [7].

1.3. Disco parabólico con motor Stirling

Esta tecnología es la más antigua, remontándose a 1800 cuando varias empresas demostraron la posibilidad de desarrollar sistemas solares basados en ciclos Rankine y Stirling. Más tarde, en la década de 1970 y principios de 1980, varias empresas americanas ligadas al sector aeroespacial desarrollaron la tecnología moderna sobre la cual se fundamenta la línea de trabajo actual.

Esta tecnología presenta dos ventajas principales:

- Un ratio de concentración elevadísimo; 2000:1, lo cual implica por un lado una alta temperatura en el receptor teniendo un rendimiento potencial de ciclo muy alto y por otro, el tener que adaptar los equipos y la instrumentación a unas temperaturas de trabajo extremas.
- No requiere fluidos circulantes por el campo solar, lo cual simplifica enormemente los sistemas.

Este tipo de centrales se componen de unidades independientes de generación de entre 5 y 25 MWe de potencia, lo cual supone un concepto de explotación modular muy similar al que puede tener una planta fotovoltaica, con un nivel de operación muy bajo y alta automatización.

El rendimiento que tienen estas plantas es muy alto, pues se puede alcanzar una conversión del 25% de la radiación solar en energía eléctrica.

Cada planta se compone de unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco. La alta concentración potencial que se puede alcanzar es debido a la baja relación distancia focal/diámetro (0,6) y a la curvatura parabólica del concentrador, lo cual se traduce en unas temperaturas de operación comprendidas entre 650 y 800°C y una eficiencia en el motor Stirling entorno al 40%.

La superficie del concentrador está cubierta por espejos de vidrio con segunda superficie con curvatura parabólica o por espejos delgados o polímeros metalizados de primera superficie soportados por una estructura de fibra de vidrio o de membrana tensionada.

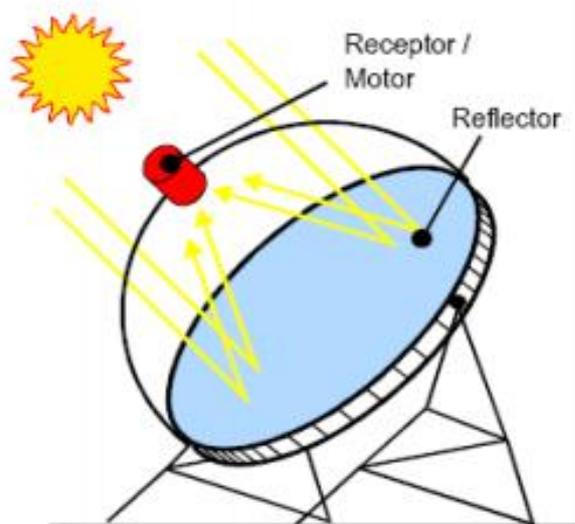


Figura 9. Esquema de unidad productora.

Los receptores son de tipo cavidad con una pequeña abertura y un sistema de aislamiento. La unidad generadora

se compone de espejos para reflejar y concentrar la radiación solar a un receptor (Figura 9), la cual se transfiere a un motor.

Una desventaja que tiene este tipo de tecnología, aunque pueda parecer lo contrario, es el espacio ocupado, ya que por cada MW de potencia hacen falta 4,5 hectáreas que es más del doble de lo que requiere una central CCP, lo cual arroja un 20% de aprovechamiento del espacio, es decir, por cada m² de superficie de captación se requieren 5 m² de terreno.

En resumen, se puede decir que, por coste, sencillez y modularidad, esta tecnología tiene un futuro prometedor y en cuanto se pongan solución a los problemas técnicos detectados hasta la fecha las ventajas expuestas se harán valer. Para que eso suceda, es necesario mayor grado de investigación y desarrollo, el cual se consigue, mediante una apuesta firme de los inversores para que este concepto llegue a un nivel de maduración que permita la explotación a nivel comercial [1].

1.4. Receptor central

Las plantas de receptor central, denominadas comúnmente como centrales de torre, consisten en una serie de espejos, denominados heliostatos, dispuestos en torno a una estructura central, focalizando la radiación solar recibida sobre un punto situado en la parte superior de la misma: el receptor.

Cada heliostato posee un sistema de movimiento independiente para poder realizar la concentración puntual de la radiación recibida.

El receptor se encarga de transformar la radiación concentrada en calor transmitiéndola a un fluido (agua, gas o sales inorgánicas). En caso de que el fluido sea agua, el receptor calienta y evapora el líquido inyectado a presión produciendo así vapor a una determinada presión y temperatura. Posteriormente, este vapor sufre una expansión en una turbina de vapor a semejanza de cualquier central termoeléctrica. Ejemplos de este tipo de centrales de torre son las plantas PS10 (10 MW) y PS20 (20MW) situadas en Sanlúcar la Mayor (Sevilla).

Entre las ventajas de las centrales de torre con vapor saturado cabe destacar la simplicidad y la reducción de precio debido a la eliminación del circuito de fluido caloportador, con el consiguiente ahorro en equipos (bombas, intercambiadores, etc.). Como desventajas, además de las ya comentadas anteriormente sobre el uso de vapor/agua como fluido de trabajo, señalar la dificultad de generar vapor saturado y la gran sensibilidad al paso de nubes.

1.4.1 Campo solar (heliostatos)

Se denomina heliostato al sistema compuesto por un espejo plano, soporte y el sistema de orientación, cuya misión es reflejar la luz solar dirigiéndola a un punto situado en la torre central donde se encuentra el receptor. Estos espejos poseen una reflectividad de 92% y se logra concentrar un 97% de la radiación incidente. Aproximadamente el espacio que ocupa cada heliostato es de 100-150 m².

De las partes que componen los heliostatos los espejos no plantean complicaciones técnicas ya que son planos, de entre 4-6 mm de espesor. Sin embargo, el soporte y el sistema de seguimiento es lo que plantea mayores complicaciones ya que debe soportar cargas de viento a la vez que realiza un seguimiento preciso del cual depende en buena medida la eficiencia de la planta.

Existen dos opciones fundamentalmente para la disposición del campo solar:

- Campo norte, en la que los heliostatos se sitúan detrás de la torre, al norte de la misma. Se aprovecha mejor el sol ya que el ángulo de incidencia es mejor, aparte de que en el receptor solo hay que disponer haces tubulares en uno de sus lados.
- Campo circular, en el que la torre si sitúa en el centro, ligeramente desplazada hacia el sur.

La disposición del campo solar depende varios factores. Los más importantes son la latitud en la que se pretenda situar la planta (cuanto mayor es la distancia al ecuador, mayor es la eficiencia óptica anual respecto a un campo circular) y el coste de la torre, que suele crecer de manera exponencial con la altura. Las centrales con campo norte requieren alturas mayores que las de campo circular para una misma potencia, por lo que dependiendo de

la potencia puede ser empezando a ser más interesante la disposición en campo circular.

Por supuesto también hay que tener en cuenta que mientras mayor sea el campo solar la eficiencia óptica disminuye y mayor es el espacio ocupado.



Figura 10. Helisotato, sistema de seguimiento y campo solar (Gemasolar). Fuente: Abengoa

1.4.2 Receptor

Uno de los elementos más críticos de la planta, situado en lo alto de la torre, es el encargado de transformar la radiación solar en energía térmica. Los estudios sobre el receptor se centran fundamentalmente en los materiales a emplear y en la disposición de los mismos de forma que se produzcan las menores pérdidas posibles, de manera que se aumente la eficiencia del receptor en sí y consecuentemente la del ciclo. En él se alcanzan grandes temperaturas y elevados gradientes térmicos [1].

El receptor está compuesto por una serie de tubos por los que circula el fluido caloportador, al que se transfiere una parte de la energía absorbida, perdiéndose el resto. El material de los tubos suele ser metálico (normalmente inoxidable) con un recubrimiento capaz de absorber más del 90% de la radiación del espectro visible y ultravioleta y de emitir poco del infrarrojo.

La disposición de estos tubos varía en función del enfoque que se le dé al receptor; existen receptores de cavidad en los que los haces de tubos se encuentran en el interior de un recinto, y en los que las pérdidas por emisión infrarroja y por fenómenos de conducción-convección se minimizan, pero aumentan las pérdidas por desbordamiento. Ejemplo de este tipo de disposición es el de las centrales PS10 y PS20 ejecutadas por Abengoa.

Otra forma de disponer los haces tubulares es de manera externa. En esta disposición las pérdidas aumentan, pero es más fácil que el sol incida en los tubos. El ejemplo de esta disposición se encuentra en Gemasolar, compuesto por paneles planos formando un polígono de más de 20 caras.

Los haces tubulares se pueden disponer de manera vertical u horizontal, dentro de las posibilidades citadas.

Otra forma de dividir los diferentes tipos de receptor es en función del fluido caloportador que manejen, dando lugar principalmente a tres tipos:

- Receptores de agua, que se transforma en vapor saturado.
- Sales fundidas
- Gases; aire u otro gas (helio, por ejemplo) el cual aumenta su entalpía en forma de calor sensible.

Por último, otra forma de clasificación puede ser realizada en función del mecanismo empleado para la transferencia de energía al fluido:

- De placa, en los que la radiación incide sobre una placa a la que van adosados los haces tubulares.
- Tubulares, en los que los rayos solares inciden directamente sobre los tubos.
- Volumétricos, en los que la radiación incide sobre una superficie con una malla trasera perpendicular a ella. Esta opción presenta ventajas termodinámicas y técnicas, pero no se ha implantado aun a nivel comercial al no haberse podido resolver inconvenientes de mecánica y resistencia de materiales [1] [8].

1.4.3 Funcionamiento

Las sales inicialmente se encuentran almacenadas en un tanque adecuadamente aislado y preparado para mantenerlas a una temperatura en torno a los 290°C. Unas bombas centrífugas (tipo VS) bombean las sales “frías” hasta el receptor situado en la parte superior de la torre (este sistema de almacenamiento frío y bombeo será el que se modele para su estudio a lo largo de este trabajo). El motor de estas bombas está situado en la parte superior del tanque mientras que el cuerpo de la bomba en la parte inferior estando ambas partes unidas por un eje.

Las sales se bombean desde el tanque hacia el receptor, donde se calientan hasta 565°C y luego se reconducen hacia un tanque donde se almacenan hasta que se requieran para la generación de vapor.

El tanque de sales calientes posee un sistema de bombeo que envía las sales al tren de generación de vapor formado por una serie de equipos para calentar el agua, generar vapor y sobrecalentarlo para entregarlo al cuerpo de alta de la turbina.

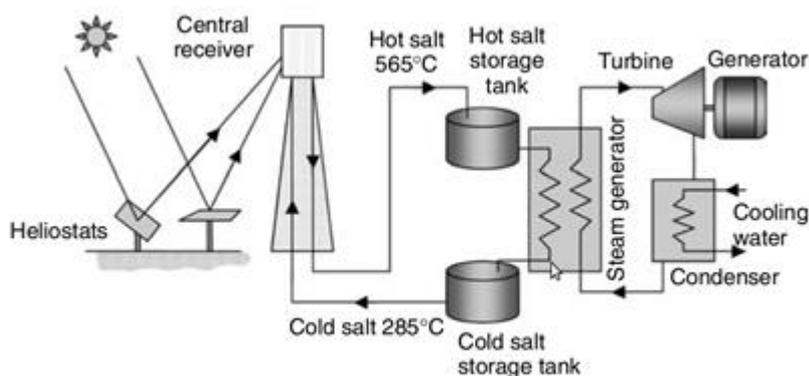


Figura 11. Esquema de central termosolar de torre.

Una vez que este vapor sale de la turbina a través de los eyectores, cambia de estado en un condensador. Este, normalmente es un intercambiador de carcasa y tubos por el que circula agua de refrigeración en el lado de los tubos y el vapor a enfriar en el lado de la carcasa. Otra opción es el uso de aerocondensadores; grandes ventiladores que enfrían mediante aire el vapor de salida ahorrando agua de refrigeración, pero disminuyendo el

rendimiento y aumentando el coste en equipos.

El agua condensada es impulsada por unas bombas cerca del condensador o aereo hasta el tanque de agua de alimentación, donde su presión es aumentada bruscamente mediante bombas de alimentación y de nuevo retorna hacia el tren de generación de vapor de forma que se cierra el ciclo agua-vapor.

1.4.4 Comparación con CCP

Se enumeran las principales diferencias con centrales CCP [1].

- El campo solar aprovecha menos el terreno. Una CCP requiere 3 m² por cada m² de superficie captadora, las centrales de torre requieren entre 5 y 8 m². Menos del 20% de la superficie de campo solar está ocupada por paneles reflectores.
- Los espejos son planos, mientras que los de las CCP son curvos, lo cual supone ahorro en la elaboración de los mismos.
- No hay fluido circulando por campo solar.
- El rendimiento teórico es mayor que en las centrales CCP. Frente al 39% máximo de una central CCP el rendimiento teórico de las centrales de torre podría superar el 42%, premisa que en la realidad no se cumple. Las centrales en operación, con generación directa de vapor, operan con rendimientos en torno al 39-40%.
- Hasta hace poco, el hecho de que las plantas CCP empleasen un parámetro de vapor mayor que las centrales de torre suponían una ventaja para las primeras. Plantas de torre que actualmente se proyectan incorporan mayores temperaturas de vapor, así como recalentamiento intermedio, ambos puntos que provocan mayor rendimiento del ciclo.
- En conjunto, las centrales de torre son un 30% más baratas que las CCP con potencia nominal comparable.

1.4.5 Gemasolar

Gemasolar fue el primer proyecto de Torresol Energy en emplear la tecnología de sales fundidas y receptor central de torre. Esta central situada en Fuentes de Andalucía (Sevilla), ocupando un espacio de 185 hectáreas. Es capaz de proporcionar 110 GWh/año, energía que es transferida mediante una línea de transmisión de alta tensión a la subestación de Villanueva del Rey desde donde se inyecta a la red de Endesa.

En 2006, la empresa Sener diseña e instala una planta piloto experimental en Plataforma Solar de Almería (PSA – CIEMAT). Entre 2006 y 2009 este proyecto piloto sirve de validación para la tecnología del receptor, sentando las bases del proyecto lanzado posteriormente en 2008 por Torresol [9] [10].

El fluido de trabajo en Gemasolar es una mezcla de sales de nitrato potásico y sódico (sal solar), las cuales son bombeadas a 290°C desde un tanque de almacenamiento (tanque de sales frías) hasta el receptor, donde son calentadas hasta los 565°C y reconducidas hasta otro tanque de almacenamiento (tanque de sales calientes). Cuando se requiere, estas sales calientes son bombeadas al sistema generador de vapor (GdV) de forma que se obtiene el vapor sobrecalentado necesario para el funcionamiento del sistema turbina/generador. Desde el GdV, las sales se reenvían al tanque frío para repetir el proceso.

Mediante el almacenamiento de sales en los tanques se obtiene un periodo de almacenamiento térmico de 15 h, lo cual permite una operación de forma casi ininterrumpida.

Los parámetros más importantes de la planta se resumen en la Tabla 1 y en la Figura 12 se muestra un detalle de la planta:

Características	Cantidad
Número de heliostatos	2650
Área total de reflexión	306658 m ²
Altura de la torre	140 m
Potencia del receptor	120 MW _{th}
Potencia de la turbina	19,9 MW _e
Almacenamiento térmico	15 h
Dimensiones del tanque	10,5 m (altura) x 23 m (diámetro)
Cantidad de sales	8500 T
Energía eléctrica generada	110000 GWh/año

Tabla 1. Parámetros principales de Gemasolar. Fuente: SolarPaces.



Figura 12. Receptor y campo solar de Gemasolar. Fuente: Torresol Energy.

1.5. Almacenamiento de energía térmica

La posibilidad de almacenamiento de energía térmica (*Thermal Energy Storage*, TES) abre la puerta a un concepto denominado “gestionabilidad” de la planta, es decir, operar de forma más estable y con cierta flexibilidad a la hora de generar, acorde a la demanda eléctrica [11]. En este apartado se comentan diversos aspectos económicos y técnicos acerca de las posibilidades que plantea el almacenamiento.

De entre los métodos existentes de almacenamiento de energía térmica, el más utilizado es sin duda el almacenamiento mediante sales fundidas. El uso de sales plantea una serie de ventajas con respecto a otros

métodos, a saber:

- Alta capacidad de almacenamiento térmico.
- El mismo fluido puede ser utilizado tanto para la transferencia de calor como para el almacenamiento. Existe posibilidad de que esto no sea así y se recurra a un almacenamiento indirecto, mediante un intercambio extra de calor entre las sales fundidas y el HTF que circula por los colectores. Este concepto se desarrollará a lo largo del apartado.
- Las sales fundidas alcanzan temperaturas más altas que otros fluidos, por lo que la eficiencia termodinámica se incrementa.
- El sistema de tubería (*piping*) se concentra en la zona central de la planta, reduciendo la longitud de dicho sistema. Esto implica que existen menos pérdidas energéticas y una reducción en los costes de material, además de permitir la identificación de potenciales problemas facilitando las operaciones de mantenimiento.

En esencia, esta configuración se basa en dos sistemas principales, como se muestra en la Figura 13: almacenamiento térmico y generación.

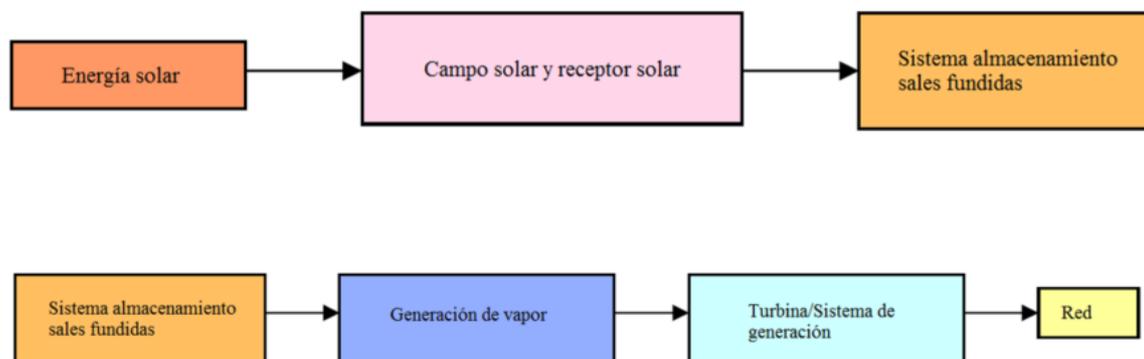


Figura 13. Sistemas principales.

Si se realizase una simulación de la operación de una planta termosolar sin almacenamiento térmico frente a otra con una capacidad de almacenamiento de 9 h se pueden extraer interesantes conclusiones. Mediante el almacenamiento, se puede trabajar un mayor número de días en condiciones nominales, lo cual se traduce en una producción de potencia más regular y en que el bloque de potencia sufre menos debido a que trabaja más tiempo en condiciones más estables. Además, se optimiza el mantenimiento y se alarga la vida de la turbina, con el consiguiente ahorro económico que ello implica [12].

Traducido a términos económicos, el parámetro LCOE (*Levelized Costs Of Electricity*) es el que permite analizar los costes de generación de energía. Este parámetro expresa la suma de gastos para inversión, combustible y mantenimiento en general, dividido por la producción de electricidad total de la planta a lo largo de su vida útil, dando como resultado el precio *break even* (umbral de rentabilidad) para la electricidad generada [13].

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad [€/kWh]$$

Siendo:

- I_t : inversión inicial
- t : vida estimada de la instalación (n años)
- M_t : costes de operación y mantenimiento

- F_t : costes de combustible
- E_t : Energía generada durante la vida de la planta
- r : tasa de descuento

Por ello, los LCOE de las termosolares dependerán en gran medida de la irradiación solar. Comparando plantas termosolares de diversas tecnologías y dimensiones para irradiación de 2000 kWh/m²h y 2600 kWh/m²h, se obtienen unos LCOE comprendidos entre 0,238 y 0,15 €/kWh respectivamente. Para lograr disminuir los costes es necesario que se incremente la “gestionabilidad” de la planta, por lo que la opción de TES resulta muy interesante:

- Las plantas sin almacenamiento tienen que vender electricidad cuando hay radiación solar disponible mientras que aquellas que incorporen sistema de almacenamiento tienen flexibilidad para vender, por ejemplo, cuando el precio de la electricidad es más elevado.
- Esta mayor flexibilidad permite que las centrales termosolares no solo sean un complemento a la potencia instalada en centrales convencionales sino que tienen capacidad para sustituirlas.
- El almacenamiento permite una mejor adaptación de la potencia del bloque de generación y la potencia térmica disponible, determinada por la irradiación y el tamaño del campo solar. Para que esto sea así, es necesario que el campo solar esté correctamente dimensionado.

Existen diversos mecanismos de almacenar la energía térmica recogida en el campo solar:

- Cambio de temperatura en el medio de almacenamiento: calor sensible.
- Cambio de fase del medio de almacenamiento: calor latente.
- Reacciones exotérmicas en el medio de almacenamiento: calor de reacción.

El mecanismo de almacenamiento de energía que se considera en este caso es en forma de calor sensible el cual se denota como:

$$Q_{sensible} = \rho C_p V \Delta T$$

Siendo:

ΔT : Incremento de temperatura [K]

V : Volumen de material [m³]

ρC_p : Capacidad térmica del medio [kJ/m³ K]

Como es de suponer, mientras más altos sean la capacidad térmica del medio y el incremento de temperatura, como se puede ver en la Figura 14 [7], mayor será el $Q_{sensible}$, y, por lo tanto, mayor almacenamiento de energía. Tomando esta idea como único criterio, el agua debería ser considerada la mejor opción, ya que aparte de tener una de las mayores capacidades térmicas de las sustancias conocidas, no es tóxica ni explosiva y además puede conseguirse a un bajo coste.

Sin embargo, no siempre tener una gran capacidad térmica es sinónimo de eficiencia en cuanto a almacenamiento de energía. Hay una serie de requisitos técnicos que influyen también en la elección del medio de almacenamiento además de la capacidad térmica. De las posibilidades existentes como medios de almacenamiento de energía se destacan:

- Agua: $\rho C_p \sim 4200 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$
- Aceites térmicos: $\rho C_p \sim 1900 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$
- Hormigón: $\rho C_p \sim 2000 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$
- Sales: $\rho C_p \sim 2800 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$

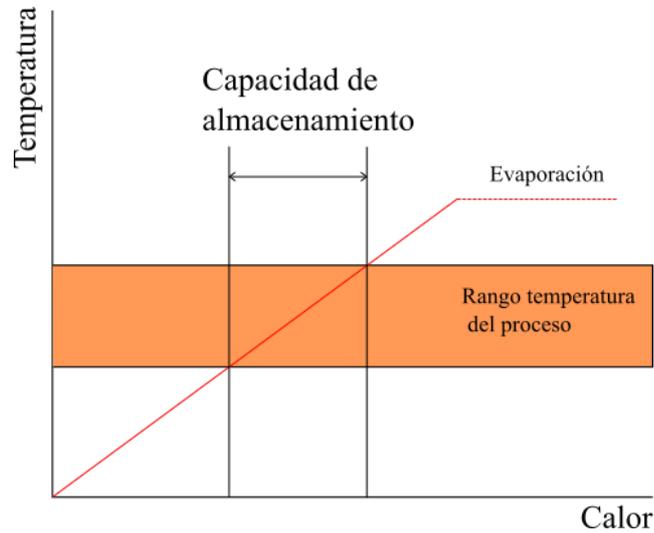


Figura 14. Capacidad de almacenamiento de calor sensible en medios líquidos.

	T min [°C]	T máx [°C]	Densidad [kg/m ³]	Conductividad térmica [W/m K]	Capacidad térmica [kJ/kg K]	Coste medio [US\$/kg]
Agua	0	100	1000	0,597	4,18	< 0,01
Aceite mineral	200	300	770	0,12	2,6	4,2
Aceite silicona	300	400	900	0,1	2,1	80
Sales nitratos	265	565	1870	0,52	1,6	3,7
Sodio líquido	270	530	850	71	1,3	21
Sales carbonatos	450	850	2100	2	1,8	11
Hormigón armado	200	400	2200	1,5	0,85	1
Acero colado	200	700	7800	40	0,6	60
Ladrillos refractarios silica	200	700	1820	1,5	1	7
Ladrillos refractarios magnesio	200	1200	3000	5	1,15	6

Tabla 2. Características de materiales para almacenamiento de calor sensible. Fuente:

La mezcla de sales que se emplea se denomina “sal solar” y está compuesta al 60% de NaNO_3 y al 40% de KNO_3 y a pesar de no ser el compuesto que posee mayor capacidad, las sales presentan otras ventajas que la hacen más atractiva con respecto al resto de posibilidades citadas, de entre las cuales cabe destacar:

- Alta capacidad térmica.
- Posee un intervalo de estabilidad comprendido entre 240°C y 600°C, acorde a las temperaturas que se

manejan en una central termosolar. Los aceites térmicos actuales, no permiten trabajar con temperaturas superiores a los 400°C debido a su inestabilidad térmica, lo cual provoca calidades de vapor moderadas y bajos rendimientos en el ciclo Rankine.

- Poseen una baja presión de vapor. Como ya se discutió en el anterior apartado en el debate de qué tipo de HTF es el más idóneo, el tener una baja P_v conlleva una serie de ventajas en cuanto a simplificación de la instalación y de las medidas de seguridad. Por ello, el agua no es una opción tan atractiva pese a sus buenas propiedades.
- Medio no explosivo, ni contaminante. En ese aspecto también el agua lo cumple perfectamente, pero los aceites térmicos, sin embargo, son inflamables y moderadamente tóxicos.

Es interesante señalar que existe la posibilidad de que el almacenamiento sea indirecto mediante la utilización de otro fluido extra que sea el que intercambia calor con el agua para la generación de vapor o, como en el caso que se analiza, que el mismo fluido actúe como HTF y como medio de almacenamiento.

En el caso de que sea indirecto, el esquema que se plantea es el que muestra la Figura 15.

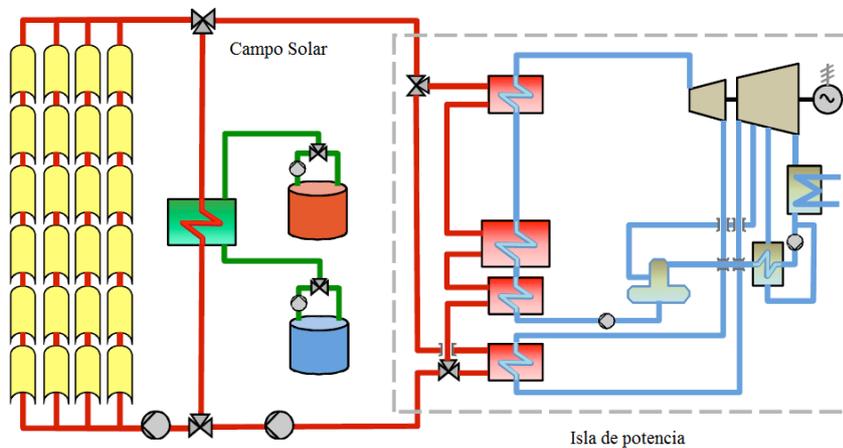


Figura 15. Esquema de almacenamiento indirecto. Fuente: CIEMAT.

Como se aprecia, se requiere un intercambiador adicional para los sistemas sales – HTF, por lo que se incrementaría el coste de inversión además de reducirse el rendimiento térmico.

La otra opción plantearía la situación que se refleja en la Figura 16.

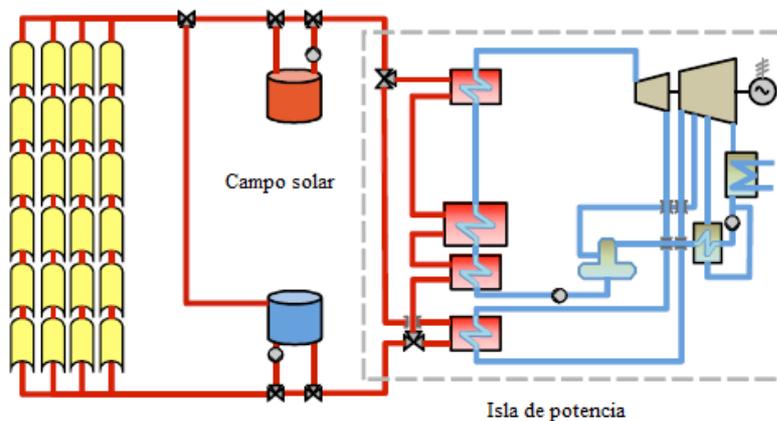


Figura 16. Esquema de almacenamiento directo. Fuente: CIEMAT.

Tanto la tecnología de receptor central, objeto de este trabajo, como la de concentrador cilindro-parabólico o captadores Fresnel, admiten la posibilidad de emplear almacenamiento energético en forma de energía térmica mediante sales fundidas, por lo que estos conceptos se pueden aplicar indistintamente a un tipo de planta u otro.

Por último, comentar brevemente cuáles son las líneas de I+D en las que las empresas trabajan actualmente [11]. Estas pueden subdividirse en 2 grupos:

- Enfocadas a los HTF
 - Mejorar los métodos de caracterizar y modelar los HTF.
 - Desarrollo de nuevos HTF y/o almacenamiento tales como metales líquidos (Na, Al/Sn), gases (N₂), nanofluidos, fluidos iónicos o S.
- Enfocadas a mejorar los métodos de almacenamiento basados en el calor sensible
 - Aditivos que disminuyan el punto de fusión de las sales fundidas o incluso logren que este esté por debajo de la temperatura ambiente.
 - Materiales más económicos para las carcasas de los depósitos de sales.

1.6. Situación actual de las centrales termosolares

A modo de cierre de este capítulo introductorio se expondrá la situación actual de las centrales termosolares a nivel nacional y global. En forma de tabla se resumirán los diferentes proyectos ejecutados y en construcción y de estos datos se extraerán conclusiones.

Nombre	Propietario	País	Localización	MW	Tecnología	TES (h)	Fecha finalización
Hassi-R'mel	Sonatrach	Argelia	Hassi R'mel	25	CCP	No	2011
Minera el Tesoro	Abengoa Solar	Chile		10	CCP	No	2013
ISCCS Al Kuraymat	NREA	Egipto	Al Kuraymat	20	CCP	No	2011
Indian Institute of Technology CSP Project	Abengoa	India		3	CCP	No	2011
Bikaner	ACME	India	Bikaner	2,5	Torre	No	2011
Godawari	Godawari Green Energy Limited	India	Naukh	50	CCP	No	2013
Reliance Areva CSP 1	Reliance Power AREVA	India		125	Fresnel		2014
ISCC Marruecos	ONE	Morocco	Ain Beni Mathar	20	CCP	No	2011
KaXu Solar One	Abengoa	South Africa	Poffader	100	CCP	3	2015
Shams 1	Abengoa Solar/Masdar/Total	UAE	Madinat Zayed	100	CCP	No	2013
SEGS Power Plants	FPL	USA	California	390	CCP	No	1985
Maricopa	Tessera Solar	USA	Arizona	1,5	Disco	No	2007
Holaniku	Keahole Solar Power	USA	Hawaii	2	CCP	2	2009
Martin Next Generation	FPL	USA	Florida	75	CCP	No	2009
Saguaro	Arizona Public Service	USA	Arizona	1,16	CCP	No	2009
Kimberlina	Ausra	USA	California	5	Fresnel	No	2009
Sierra Sun Tower	eSolar	USA	California	5	Torre	No	2009
Cameo hybrid	Xcel Energy	USA	Colorado	2	CCP	No	2010
Nevada Solar One	Acciona	USA	Nevada	64	CCP	0,5	2007
Holaniku at Keyhole Point	Keahole Solar Power, LLC	USA	Keahole Point, Hawai	2	CCP	No	2009
Solana	Abengoa Solar	USA	Arizona	280	CCP	6	2013
Genesis Solar	NextEra Energy	USA	California	250	CCP	No	2013/2014
Ivanpha	BrightSource	USA	California	392	Torre	No	2013
Mojave	Abengoa Solar	USA	California	280	CCP	No	2014

Total	2205,16
--------------	---------

Tabla 3. Proyectos termosolares ejecutados a nivel global. Fuente: Protermo Solar.

Nombre	Propietario	País	Localización	MW	Tecnología	TES (h)
Kogan Creek	Areva	Australia	Kogan Creek	44	Fresnel/CCP	
Atacama 1	Abengoa	Chile	Maria Elena, Antofagasta	110	Torre sales fundidas	Sí
Supcon	Supcon Solar	China	Delingha	50	Torre	Sí
Yanchi		China	Ningxia Hui	92,5	CCP	No
EOS		Chipre		25	Torre	Sí
Alba Nova 1	Solar Euromed	Francia	Corsica	12	Fresnel	1
Megha	Megha Engineering	India	Andhra Pradesh	50	CCP	No
Ashalim	Alstom y BrightSource	Israel	Negev Desert	130	Torre	No
Agua Prieta	Abengoa	México	Sonora	15	CCP	No
NOOR I	Acwa/Aries/TSK	Marruecos	Ouarzazate	160	CCP	3
Noor 2	ACWA	Marruecos	Ouarzazate	200	CCP	Sí
Noor 3	ACWA	Marruecos	Ouarzazate	150	Torre sales fundidas	Sí
Bokpoort	ACWA/Solafrica	Sudáfrica	Northern Cape Province	50	CCP	9,3
Khi Solar One	Abengoa	Sudáfrica	Uppington	50	Torre	2
Xina Solar One	Abengoa (40%) Industrial Development Corporation (IDC), Public Investment Corporation (PIC)	Sudáfrica	Pofadder	100	CCP	5
Redstone CSP	Solar Reserve/ACWA	Sudáfrica	Postmasburg	100	Torre sales fundidas	12
Kathu Solar Park	GDF Suez/Others	Sudáfrica		100	CCP	4,5
Kiwano (Eskom)	Eskom	Sudáfrica	Uppington	100	Torre	
Ilanga	Karoshhoek Consortium	Sudáfrica	Uppington	100	CCP	4,5
Crescente Dunes (Tonopah)	Solar Reserve	USA	Nevada	110	Torre sales fundidas	10

Total	1748,5	Total (conocido)	51,3
--------------	--------	-------------------------	------

Tabla 4. Proyectos termosolares actualmente en construcción. Fuente: ProtermoSolar

De estas dos primeras tablas, las conclusiones que pueden extraerse son las siguientes:

- La tecnología CCP es la que posee una mayor potencia instalada, por lo que es la tecnología que posee mayor nivel de maduración y horas de operación.
- En los proyectos ejecutados, la mayoría no contemplaban el almacenamiento térmico, mientras que en los proyectos que actualmente se construyen es la tendencia mayoritaria. Se ven reflejadas por tanto las

ventajas que introduce el almacenamiento térmico en las apuestas de los inversores para la producción de energía.

Nombre	Propietario	Localización	MW	Tecnología	TES
PS10	Abengoa Solar	Sanlúcar la Mayor (Sevilla)	10	Torre con Vapor Saturado	1
Andasol 1	RREEF/ANTIN/COBRA	Aldeire (Granada)	50	CCP	7,5
Puerto Errado I	Novatec	Calasparra (Murcia)	1,4	Fresnel	0,5
PS20	Abengoa Solar	Sanlúcar la Mayor (Sevilla)	20	Torre con Vapor Saturado	1
Ibersol Puertollano	Iberdrola Energía Solar de Puertollano	Puertollano (Ciudad Real)	50	CCP	N/A
Andasol 2	RREEF/ANTIN/COBRA	Aldeire/la Calahorra (Granada)	50	CCP	7,5
La Risca	Acciona/ Mitsubishi Corp.	Alvarado (Badajoz)	50	CCP	N/A
Extresol-1	COBRA	Torre de Miguel Sesmero (Badajoz)	50	CCP	7,5
Extresol-2	COBRA	Torre de Miguel Sesmero	50	CCP	7,5
Solnova 1	Abengoa Solar	Sanlúcar la Mayor (Sevilla)	50	CCP	N/A
Solnova 3	Abengoa Solar	Sanlúcar la Mayor (Sevilla)	50	CCP	N/A
La Florida	Renovables SAMCA, S.A.	Badajoz	50	CCP	7,5
Solnova 4	Abengoa Solar	Sanlúcar la Mayor (Sevilla)	50	CCP	N/A
Majadas	Acciona/ Mitsubishi Corp.	Majadas (Cáceres)	50	CCP	N/A
La Dehesa	Renovables SAMCA, S.A.	La Garrovilla (Badajoz)	50	CCP	7,5
Palma del Río II	Acciona/ Mitsubishi Corp.	Palma del Río (Córdoba)	50	CCP	N/A
Manchasol-1	COBRA	Alcázar de San Juan (Ciudad Real)	50	CCP	7,5
Gemasolar	Torresol	Fuentes de Andalucía (Sevilla)	20	Torre con sales	15
Manchasol-2	COBRA	Alcázar de San Juan (Ciudad Real)	50	CCP	7,5
Palma del Río I	Abengoa Solar/JGC Corporation	Palma del Río (Córdoba)	50	CCP	N/A
Lebrija 1	Valoriza/Siemens	Lebrija (Sevilla)	50	CCP	N/A

Andasol 3	S. Millennium/Ferrostaal/ RWE/Rhein E./SWM	Aldeire/la Calahorra (Granada)	50	CCP	7,5
Helioenergy 1	Abengoa Solar/EON	Écija (Sevilla)	50	CCP	N/A
Arcosol 50	Torresol	San José del Valle (Cádiz)	50	CCP	7,5
Astexol II	Elecnor/Eiser/Aries	Badajoz	50	CCP	N/A
Termesol-50	Torresol	San José del Valle (Cádiz)	50	CCP	7,5
Puerto Errado II	Novatec, EBL, IWB, EWZ, EKZ y EWB.	Calasparra (Murcia)	30	Fresnel	0,5
Helioenergy 2	Abengoa Solar/EON	Écija (Sevilla)	50	CCP	N/A
Aste 1A	Elecnor/Eiser/Aries	Alcázar de San Juan (Ciudad Real)	50	CCP	N/A
Aste 1B	Elecnor/Eiser/Aries	Alcázar de San Juan (Ciudad Real)	50	CCP	N/A
Solacor 1	Abengoa Solar/JGC Corporation	El Carpio (Córdoba)	50	CCP	N/A
Solacor 2	Abengoa Solar/JGC Corporation	El Carpio (Córdoba)	50	CCP	N/A
Morón	Ibereolica	Morón de la Frontera (Sevilla)	50	CCP	N/A
Helios 1	Abengoa Solar	Puerto Lapice (Ciudad Real)	50	CCP	N/A
Solaben 3	Abengoa Solar/ITOCU	Logrosán (Cáceres)	50	CCP	N/A
Guzmán	Plenium/FCC/Mitsui	Palma del Rio (Córdoba)	50	CCP	N/A
Olivenza 1	Ibereolica	Olivenza (Badajoz)	50	CCP	N/A
La Africana	Grupo Ortiz – Grupo TSK – Magtel	Fuente Palmera (Córdoba)	50	CCP	7,5
Orellana	Acciona	Orellana (Badajoz)	50	CCP	N/A
Helios 2	Abengoa Solar	Puerto Lapice (Ciudad Real)	50	CCP	N/A
Extresol-3	COBRA	Torre de Miguel Sesmero (Badajoz)	50	CCP	7,5
Solaben 2	Abengoa Solar/ITOCU	Logrosán (Badajoz)	50	CCP	N/A
Termosolar Borges	Abantia /Comsa EMTE	Borges Blanques (Lleida)	22,5	CCP + Hibridación con Biomasa	N/A
Solaben 1	Abengoa Solar	Logrosán (Cáceres)	50	CCP	N/A

Termosol 1	Nextera-FPL	Navalvillar de Pela (Badajoz)	50	CCP	9
Enerstar	Plenium/FCC/Mitsui	Villena (Alicante)	50	CCP	N/A
Casablanca	COBRA	Talarrubias (Badajoz)	50	CCP	7,5
Termosol 2	Nextera-FPL	Navalvillar de Pela (Badajoz)	50	CCP	9
Solaben 6	Abengoa Solar	Logrosán (Cáceres)	50	CCP	N/A
Arenales	RREEF/STEAG/OHL	Morón de la Frontera (Sevilla)	50	CCP	7

Total	2309,3	Total	148
--------------	--------	--------------	-----

Tabla 5. Proyectos termosolares ejecutados y en ejecución en España. Fuente: Protermo Solar.

A la vista de estos datos se puede concluir que:

- Solo en España la potencia nominal de las centrales instaladas y en ejecución suman un total de 2309,5 MW mientras que en el resto del mundo suman 3953,66 MW. Este dato es un buen indicador de por qué se considera a España puntera en el desarrollo de tecnología termosolar.
- La ingeniería y el EPC de una parte significativa de las centrales realizadas a nivel nacional e internacional ha sido llevado a cabo por empresas españolas, lo cual hace patente el hecho de que existe una buena base de *know-how* a nivel nacional para este tipo de proyectos.

Por último, centrándonos en el ámbito local, cabe destacar que sólo en la provincia de Sevilla se cuenta con 450 MW de potencia nominal de turbina en las centrales construídas y en funcionamiento, como se ilustra en la Figura 17.

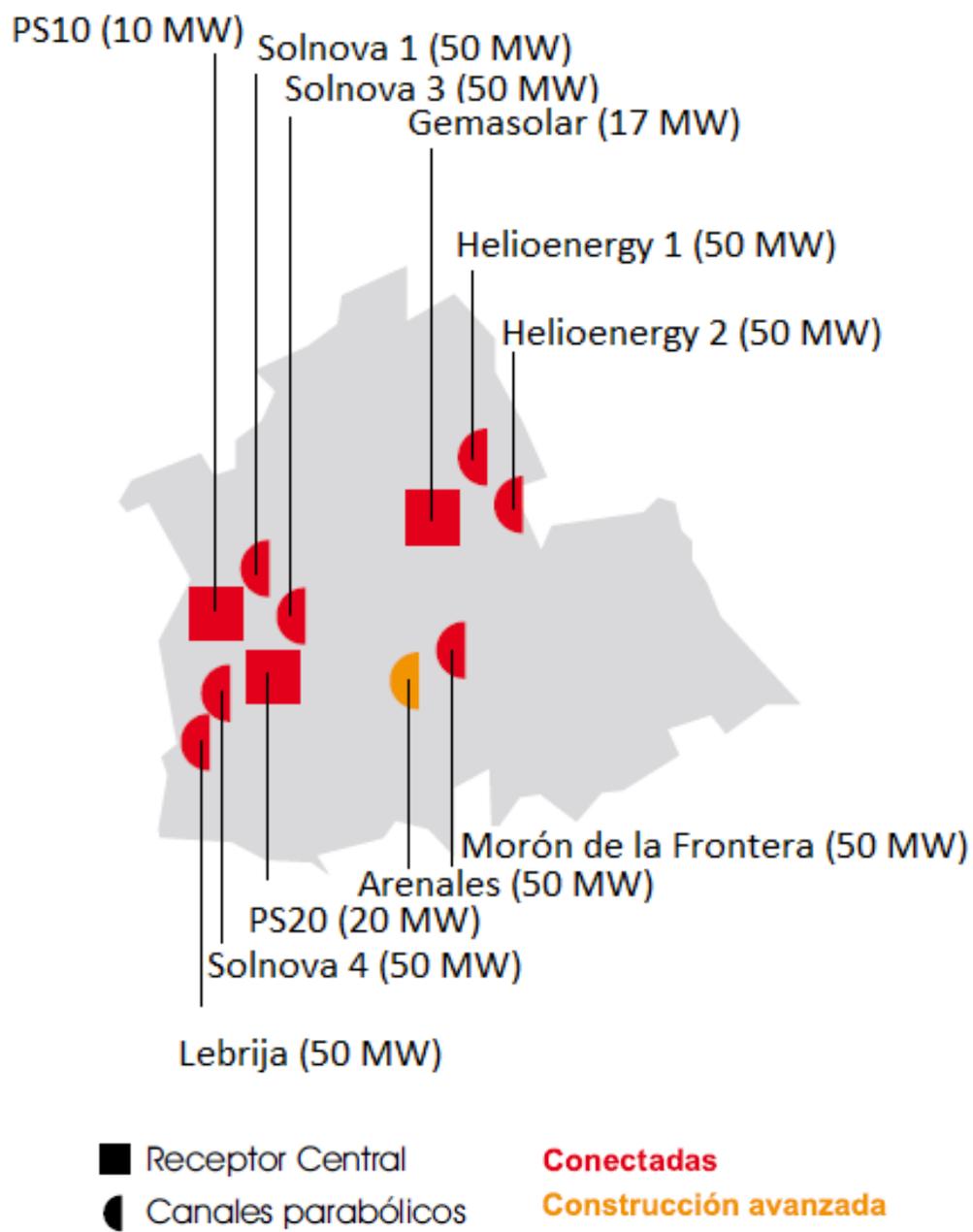


Figura 17. Centrales termosolares en la provincia de Sevilla. Fuente: Protermo Solar

2 SISTEMAS DE LA PLANTA Y FUNCIONAMIENTO

EN este capítulo se presentará el funcionamiento de los sistemas más importantes que componen la planta simulada. El objetivo es obtener un diagrama general de funcionamiento y un diagrama de tubería e instrumentación (P&ID) de la parte del sistema de sales que se va a modelar.

Los sistemas que se describen son los siguientes.

- Ciclo agua-vapor
- Utilities (sistemas auxiliares)
- Receptor solar
- Sistema de sales

2.1 Ciclo agua-vapor

El sistema de vapor es posiblemente junto con el de sales el más complejo de toda la planta, tanto a nivel de proceso como a nivel de instrumentación. La función principal del ciclo agua-vapor es transportar el vapor desde el tren de generación hasta la turbina de vapor y retornar hacia la caldera el agua condensada.

El vapor es un fluido barato y es fácil ajustar con mucha precisión la temperatura del mismo, gracias a la relación existente de presión y temperatura, mediante válvulas reguladoras. Puede transportar grandes cantidades de energía con poca masa. Como inconvenientes se pueden señalar las altas presiones y el tratamiento estricto que requiere para que no se produzcan inconvenientes como por ejemplo incrustaciones [14].

El ciclo-agua vapor es demasiado extenso como para condensarlo en un solo sistema, por lo que normalmente se suele subdividir en varios para poder gestionarlo más fácilmente. Una división podría ser la siguiente:

- Agua de alimentación
- *By-pass* de las extracciones de la turbina
- Generación de vapor
- Condensador
- Turbina

A continuación, se explican brevemente cada uno de estos subsistemas y los equipos más importantes que intervienen en cada uno de ellos.

2.1.1 Agua de alimentación

Este sistema es el encargado de suministrar el agua de alimentación al generador de vapor para que este alimente a la turbina mediante intercambio térmico con las sales fundidas. El agua se impulsa desde el desgasificador mediante un juego de bombas.

Los equipos que componen este sistema son:

- Bombas
- Desgasificador
- Precalentadores

El agua de alimentación se almacena en el desgasificador, el cual también elimina gases incondensables que están disueltos en el tanque de agua de alimentación (oxígeno fundamentalmente), con esto se consigue que el

agua no sea tan corrosiva y dañe los equipos de generación. Esta operación se lleva a cabo inyectando vapor directamente de una de las extracciones de alta presión de la turbina de la turbina.

Las bombas impulsan el agua hacia el generador de vapor a través de los precalentadores de alta presión, en los cuales se calienta por efecto del vapor que circula por el lado de la carcasa procedente nuevamente de extracciones del cuerpo de alta de la turbina.

Los precalentadores tienen la función de elevar la temperatura del agua de entrada al economizador.

2.1.2 Generación de vapor

Este sistema es el encargado de producir el vapor de alta presión en el tren de generación para alimentar al cuerpo de alta presión de la turbina (AP), en donde se produce la primera expansión del mismo. Asimismo, este sistema calienta el vapor recalentado frío para convertirlo en vapor recalentado caliente y así alimentar al cuerpo de baja presión de la turbina (BP), donde se produce una segunda expansión.

Los equipos que formarían parte de este subsistema son:

- Economizadores
- Generador de vapor (calderín)
- Sobrecalentador
- Recalentador

Algunos de estos equipos forman parte del sistema de sales ya que al ser intercambiadores (de carcasa y tubos generalmente) tendrán dos partes independientes, por lo que volverán a aparecer más adelante.

Las bombas de agua de alimentación llevan el agua hasta el economizador, el cual se encarga de elevar la temperatura del agua que le llega a través de los precalentadores hasta prácticamente la temperatura de saturación del evaporador, pero manteniendo un grado de subenfriamiento suficiente que evite vaporización del agua a la entrada del calderín.

Tras su paso por el generador de vapor, el agua pasa a ser vapor saturado que entra al sobrecalentador, el cual a su vez eleva la temperatura del vapor para entregarlo al cuerpo de alta presión de la turbina en forma de vapor sobrecalentado. Tras la primera expansión, el vapor recalentado frío se conduce hacia el recalentador y tras pasar por él, se entrega al cuerpo de baja de la turbina para que se produzca la segunda expansión.

2.1.3 Bypass de las extracciones de la turbina

Este sistema actúa de unión entre el resto de sistemas que componen el ciclo agua-vapor de la planta. Las funciones de este sistema son las siguientes:

- Entregar el vapor producido por el generador de vapor a los cuerpos de alta y baja presión de la turbina.
- *Bypass* y atemperación con agua de refrigeración del vapor de alta presión.
- *Bypass* y atemperación de vapor de salida del recalentador al condensador.
- Proporcionar vapor de una extracción del cuerpo de baja de la turbina al desgasificador.
- Proporcionar vapor de extracciones de alta a los precalentadores y calentar el agua de alimentación al generador de vapor.

Todas estas operaciones se llevan a cabo mediante los siguientes equipos:

- Precalentadores de agua en el lado de alta presión
- Precalentadores de agua en el lado de baja presión
- Válvulas de *bypass* (una para alta y otra para baja)
- Desgasificador

Las válvulas de *bypass* tienen la función de simular a la turbina, ya que a la salida de estas debe haber la misma presión y temperatura que si el vapor hubiera atravesado la turbina. Para ajustar la presión, en su interior se produce una expansión, pero la temperatura es más alta. Por ello, deben ayudarse de válvulas de atemperación,

que deben evacuar todo el caudal de forma constante. El ajuste de estas válvulas es muy sensible y debe estar coordinado con la válvula de admisión a la turbina. El comisionado de estas válvulas es muy delicado [14].

Los precalentadores de baja presión calientan el agua que entra al desgasificador proveniente del tanque de condensado, la cual es impulsada por las bombas de condensado, cerrando así el ciclo. Su funcionamiento es análogo a los precalentadores de alta solo que las extracciones de vapor que calientan el agua provienen del cuerpo de baja presión de la turbina.

2.1.4 Turbina de vapor

Uno de los equipos más importantes de la planta. No posee unas características diferentes a la que se puede encontrar en cualquier planta de potencia. Su funcionamiento es de sobra conocido: mediante escalonamientos de álabes (estator y rotor) se produce una expansión de la corriente proveniente del tren de vapor transformando la energía térmica en mecánica para mover el eje acoplado al generador.

Como se ha ido comentando en anteriores apartados, la configuración del ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración requiere de una turbina de dos etapas y con posibilidad de realizar extracciones a lo largo de la línea de expansión de la turbina. El cuerpo de la turbina viene dividido en dos partes, una etapa de alta presión y otra etapa de baja presión. El flujo procedente de la turbina de alta presión es direccionado hacia la turbina de baja presión una vez ha sido recalentado. Los ejes de ambos cuerpos se conectan de forma axial con el eje del generador eléctrico [15].

2.1.5 Condensador

La función de este sistema es la de aportar agua condensada desde el tanque de condensado (a la salida del condensador) hacia el desgasificador. Los equipos que forman parte de este sistema son:

- Condensador
- Bombas de condensado
- Tanques de condensado
- Precalentadores de baja presión
- Desgasificador

El condensador está situado a la salida del cuerpo de baja de la turbina y su función es la de condensar el vapor, así como la de eliminar los gases incondensables y nocivos ya que pueden ser muy corrosivos. La opción considerada en el proyecto es la utilización de aerocondensador, el cual refrigera el vapor mediante aire valiéndose de unos grandes ventiladores.

Finalmente, las bombas de condensado, de gran tamaño, son las encargadas de impulsar el agua hacia el desgasificador, cerrando así el ciclo.

2.1.6 Diagrama de ciclo

Se presenta a continuación un esquema del ciclo agua-vapor que se lleva a cabo en la planta. En verde, se muestran las líneas de agua de alimentación/condensado y en rojo las líneas de vapor, tanto las principales como las extracciones de turbina.

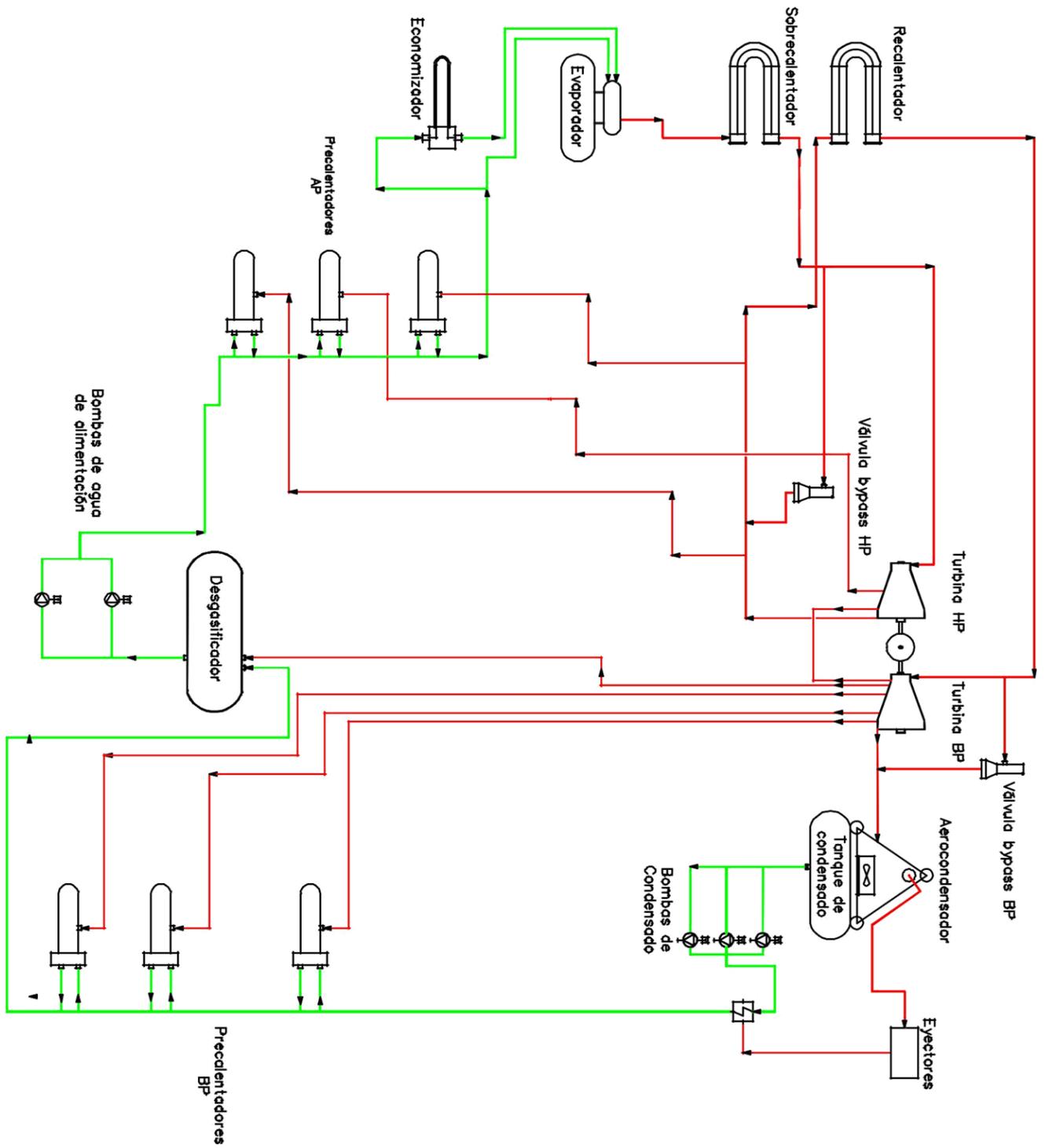


Figura 18. Diagrama ciclo agua-vapor

2.2 Utilities

Se denominan utilities a todos aquellos sistemas auxiliares de la planta. En una planta de estas características estos suelen ser los sistemas más comunes:

- Fuel Oil
- Aire comprimido
- Sistemas de aguas: desmineralizada, osmotizada (limpieza de heliostatos/colectores), filtrada, etc. Dentro de estos suelen contemplarse; tanques de almacenaje y bombas.

Para la aplicación bajo estudio, interesa conocer en profundidad el sistema de aire comprimido. Este sistema tiene las siguientes funciones:

- Proveer de aire filtrado y seco para el accionamiento de válvulas neumáticas en todos los demás sistemas de la planta.
- Proporcionar aire en el sistema de sales fundidas para la línea de balanceo.

Con idea de concentrar en un mismo apartado toda la descripción de instrumentación y descripción de lazo de control se comentará en el apartado del sistema de sales la información sobre la línea de balanceo.

2.3 Receptor solar

El sistema del receptor solar está compuesto por los siguientes elementos:

- Tanque de entrada de sales al receptor.
- Tanque de salida
- Línea de bypass

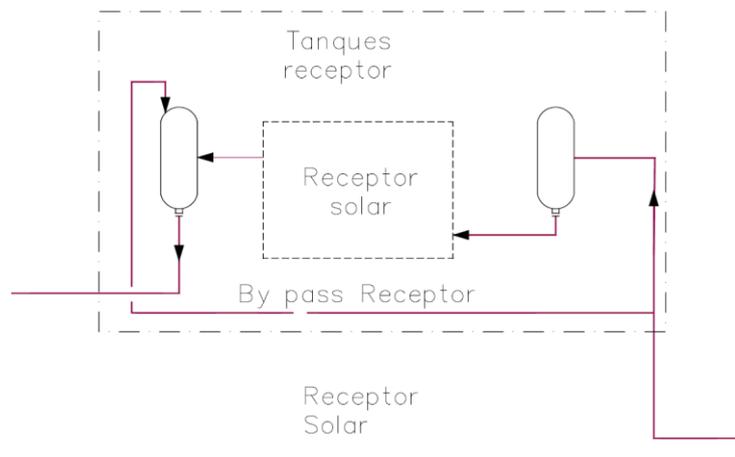


Figura 19. Esquema del receptor.

Los aspectos constructivos del receptor se corresponden con los descritos en el apartado introductorio, pudiendo ser de cualquiera de las opciones enumeradas sin afectar al resto de elementos descritos en la planta.

Para entender el funcionamiento del sistema es necesario conocer los modos de operación posibles de la planta. El modo de operación de la planta es diferente en función de las condiciones meteorológicas y el estatus inicial de la planta.

- Situación *stand-by*

Las sales se bombean al receptor llenando la línea de alimentación al receptor (*riser*) y la de retorno

(*downcomer*). Como se puede observar en la Figura 19, una vez completado el llenado, las sales suben al tanque de entrada al receptor, pasan a través del *bypass* del receptor y descienden por el *downcomer* hacia el tanque de sales frías. Durante esta situación de *stand-by* el “traceado” (sistema de calentamiento auxiliar de las líneas) se encuentra operativo. Una vez que la transferencia de sales se ha estabilizado, el arranque continúa con el precalentamiento del receptor.

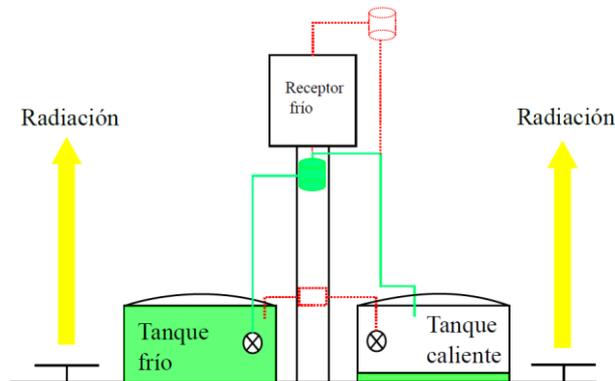


Figura 20. Situación *stand-by*.

- Precalentamiento del receptor

El precalentamiento del receptor se realiza gracias a los heliostatos del campo solar. Estos, enfocan hacia el receptor, elevando su temperatura. Durante este proceso, las sales no entran todavía en el receptor, sino que circulan a través del *bypass* hasta que este alcanza la temperatura suficiente para su funcionamiento normal.

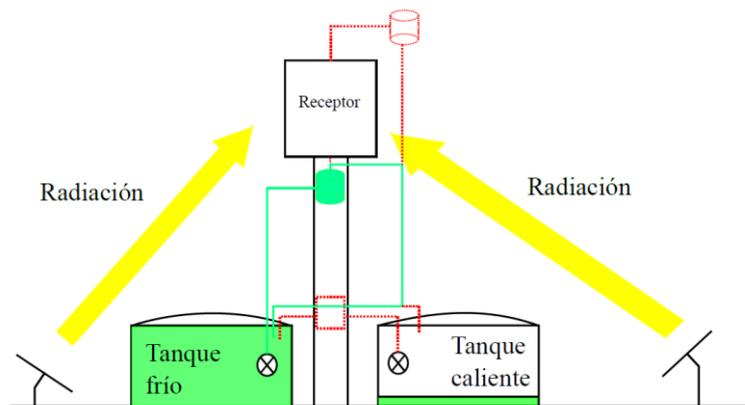


Figura 21. Precalentamiento del receptor.

- Modo normal de operación

Una vez que el receptor ha alcanzado la temperatura suficiente y que el circuito ha sido calentado adecuadamente, el *bypass* del receptor se cierra, el receptor se carga y el tanque de sales de la salida de este, se llena con sales a 560°C sin ningún riesgo de solidificación.

Mientras que las sales circulan por el receptor, el campo solar formado por los heliostatos apunta hacia el receptor, transmitiendo la energía térmica a las sales.

Desde el tanque de la salida del receptor, las sales descienden hasta el tanque de sales calientes, del cual son bombeadas hacia el sistema de generación de vapor. Una vez que se enfrían tras el sistema de generación de vapor, las sales retornan hacia el tanque de sales frías.

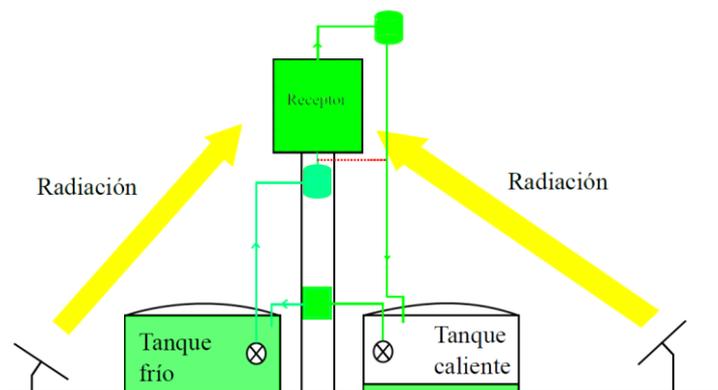


Figura 22. Modo normal de operación.

- Stand-by debido a condiciones adversas

Esta situación es resultado de que el día sea nublado, o de otro tipo de condiciones adversas, que provoca que la radiación solar recibida, sea más baja de lo normal durante un tiempo.

De cara a este tipo de situaciones, se define este modo de operación. El campo solar continúa enfocado hacia el receptor y la circulación de sales se controla para que mantenga el flujo correspondiente a condiciones normales de operación. Estas condiciones de seguridad han sido establecidas de cara a prevenir una sobreexposición o sobrecarga térmica en el receptor cuando no hay nubes.

El receptor estará preparado por tanto para operar cuando se despeje el cielo.

- Vaciado del receptor

Este proceso será necesario cuando la energía térmica del receptor es insuficiente para mantener el sistema receptor en operación. Esto puede ocurrir de forma súbita durante el modo de operación normal, cuando se espera un largo periodo de baja radiación. El sistema receptor para de producir energía solar.

Los heliostatos deberán permanecer en modo *stand-by*, es decir, sin apuntar al receptor, mientras que las sales son enviadas mediante apertura del *bypass* hacia el tanque de sales frías, de cara a vaciar el receptor.

Gracias a la capacidad de almacenamiento energético de las sales calientes, el suministro de sal del sistema de generación de vapor no se ve interrumpido en periodos de baja radiación. El bombeo hacia el sistema de generación de vapor continúa para abastecer de sales el proceso de generación de vapor y, tras el enfriamiento, volverán al tanque de sales frías. Esto sucederá hasta que el tanque de sales calientes se quede vacío, de manera que sólo quede su nivel mínimo, estando el resto en el tanque frío.

- Estado inicial de la planta o parada de larga duración

En estado inicial o tras una larga parada, los equipos se encuentran sin servicio a temperatura ambiente. Todas las líneas de sales del receptor se encuentran vacías, estando todo el contenido de sales en el tanque de sales frías, mientras que, en el caliente, el nivel de sales está al mínimo, como se aprecia en a figura 1. La temperatura de las sales se mantendrá en todo momento en ambos tanques por encima de los 280°C, gracias a la acción de las resistencias destinadas a tal efecto.

Para el arranque del receptor, se activa todo el “trazado” eléctrico en el circuito de sales antes de que las sales comiencen a circular.

Previo al bombeo de sales al receptor solar, los equipos y las tuberías deben estar, al menos, a 280°C, que es la temperatura mínima de operación de las sales.

Una vez que se alcanza esta temperatura en el tanque de entrada al recibidor y las tuberías, comienza el bombeo de sales.

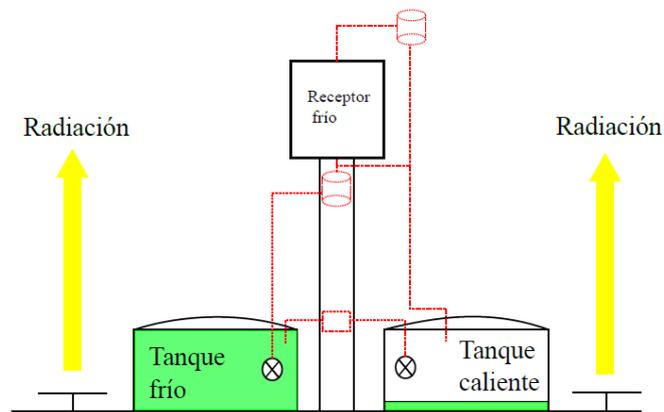


Figura 23. Situación inicial.

2.7 Sistema de sales

El sistema de sales lleva a cabo las siguientes funciones:

- Absorber y transformar la radiación solar en potencia térmica mediante el aumento de temperatura de las sales fundidas.
- Almacenar energía en forma de sales fundidas para operar sin radiación solar.
- Intercambiar calor en el generador de vapor con el ciclo agua-vapor para el precalentamiento del agua de alimentación y la producción de vapor necesario en la turbina.

El HTF (*Heat Transfer Fluid*) es una mezcla de sal fundida formada por nitrato sódico (NaNO_3) y nitrato potásico (KNO_3) en una proporción 60-40% en peso.

Para llevar a cabo dichas funciones, el sistema consta de los siguientes elementos:

- Tanque de sales frío
- Tanque de sales calientes
- Línea de balanceo
- Bombas del receptor solar
- Bombas de atemperación
- Bombas del generador de vapor
- Evaporador
- Recalentador
- Sobrecalentador
- Tanque de drenaje de sales del generador de vapor
- Bombas del tanque de drenaje de sales del generador de vapor
- Resistencia de los tanques de sales (frío y caliente)

2.7.1 Funcionamiento, instrumentación y lazos de control del sistema

Inicialmente las sales fundidas frías se almacenan a 280°C en el tanque de sales frías y son impulsadas por las bombas del receptor hacia la torre solar a través de una tubería (*riser*) para absorber la radiación solar y alcanzar la temperatura adecuada a la salida del receptor.

Una vez calentadas a 560°C se enviarán a los tanques de sales calientes a través de una tubería desde el receptor solar (*downcomer*) donde permanecerán almacenadas. El almacenamiento térmico suele estar diseñado para funcionar de manera ininterrumpida en torno a 15 h.

Mediante las bombas del generador de vapor, las sales serán impulsadas desde los tanques de sales calientes hacia el generador de vapor para intercambiar energía con el ciclo agua-vapor calentando el agua y produciendo el vapor que alimentará a la turbina.

Una vez que se ha producido el intercambio, las sales retornan al tanque de sales frías.

Tanto el tanque de sales frías como los de sales calientes, están equipados con resistencias eléctricas para compensar la pérdida de temperatura de las sales.

Los tanques se mantienen inertizados mediante aire comprimido para evitar la entrada de humedad en los mismos y reducir la cantidad de óxidos de nitrógeno producidos por la descomposición de las sales. Durante la carga y descarga de tanques el aire de inertización se trasvasa de un tanque a otro a través de una línea de balanceo. Se pretende así mantener el sistema inertizado a una presión adecuada (10-20 mbar) inyectando o evacuando mediante válvulas de control de presión aire comprimido en la línea de balanceo.

- Tanque de sales calientes

La función de los tanques es la de mantener la temperatura de las sales en torno a 560°C.

Para la descarga de sales, cada tanque posee una bomba del generador de vapor y su correspondiente línea de impulsión. Dichas líneas de impulsión conforman las líneas de salida de sales.

En cuanto a las líneas de entrada de sales y recirculación de las mismas a cada tanque se lleva a cabo mediante las siguientes líneas:

- Línea mínima de recirculación de la bomba
- Entrada del *downcomer*
- Recirculación de sales
- Entrada desde el tanque de drenaje

Los tanques están conectados en su interior con dos anillos de recirculación interna para distribuir adecuadamente las sales en el interior de los tanques. Uno de la recirculación del generador de vapor, ya que está aislado como se ha mencionado, y otro para las sales procedentes del *downcomer*.

Para mantener la temperatura de las sales en torno a los 560°C los tanques estarán equipados con resistencias eléctricas de manera que entren en funcionamiento sólo en el caso en el que la temperatura no se pueda homogeneizar mediante la recirculación de sales. En ese caso, funcionarán conjuntamente con la recirculación.

- Bombas del receptor

Este juego de bombas está diseñado para impulsar las sales frías desde el tanque correspondiente hasta el receptor solar. Cada bomba dispondrá de variador de frecuencia para adaptar la velocidad a los requerimientos de carga.

En cuanto a instrumentación, cada línea de impulsión consta de una válvula de corte, un transmisor de temperatura, un manómetro y dos transmisores de presión:

Bomba	Temperatura	Válvula	Presión
10-P-01A	10-TIT-001	10-XV-001	10-PIT-001A/B 10-PG-001
10-P-01B	10-TIT-002	10-XV-002	10-PIT-002A/B 10-PG-002
10-P-01C	10-TIT-003	10-XV-003	10-PIT-003A/B 10-PG-003
10-P-01D	10-TIT-004	10-XV-004	10-PIT-004A/B 10-PG-004

Tabla 6. Instrumentación de las bombas del receptor.

Las válvulas todo/nada previenen el retorno de las sales hacia las bombas y sirven para asegurar que las bombas arrancan con la impulsión cerrada.

En el colector común de impulsión de las bombas está la línea de mínima recirculación con la válvula 10-PV-001, controlada por la presión de descarga de las bombas. En caso de un aumento en la misma, la válvula abrirá para que el sistema sea capaz de amortiguar esa variación. En caso de una disminución, cerrará para evitar que el sistema se vacíe.

En la línea de impulsión común de estas bombas se sitúan el caudalímetro 10-FIT-001 y la medición de temperatura 10-TIT-005 antes de ir hacia el receptor.

- Bombas de atemperación

Durante los arranques y las paradas del generador de vapor, si existen rampas de calentamiento muy pronunciadas, los equipos pueden sufrir estrés térmico. Para evitar este efecto adverso se realizan mezclados de sales calientes, impulsadas por las bombas de generación de vapor. Las sales frías son bombeadas por este juego de bombas. Por lo tanto, estas bombas están diseñadas para funcionar en paralelo con las del generador de vapor.

Estas bombas también cuentan con variadores de frecuencia para regular la carga. De forma análoga a las bombas del receptor, cada línea dispone de un manómetro y dos transmisores de presión:

Bomba	Presión
10-P-02A	10-PIT-005A/B 10-PG-005
10-P-02B	10-PIT-006A/B 10-PG-006

Tabla 7. Instrumentación de bombas de atemperación.

En la línea de impulsión común de estas se sitúa la temperatura 10-TIT-006, la presión 10-PIT-005 y la medida de caudal 10-FIT-002, antes de la entrada al generador de vapor.

El lazo de control 10-PIC-002 tiene como objetivo asegurar un caudal de mínima recirculación a las bombas de manera que se evite la estratificación y a la vez se controle la presión en el interior del tanque del cual succionan.

En el caso de que se detecte un aumento de la presión de descarga, la válvula 10-PV-002 deberá abrir para que el sistema pueda absorber el cambio y viceversa. El tipo de controlador empleado será un PID.



Figura 24. Detalle de estructura de bomba de sales fundidas.

- Bombas del generador de vapor

El objetivo de estas bombas es impulsar las sales calientes hacia el generador de vapor, para que las turbinas se puedan alimentar. Durante los arranques y paradas, de cara a reducir el estrés térmico, este juego de bombas funcionará en conjunto con las de atemperación.

- Generador de vapor

Como ya se ha visto en apartados anteriores, el generador de vapor permite el intercambio de calor desde las sales para el ciclo agua-vapor para obtener el vapor que permita mover las turbinas.

- Sistema de drenajes

Este sistema está compuesto por:

- Tanque de drenaje
- Bombas de drenaje

El tanque recoge las sales fundidas en caso necesario de drenar las líneas y los equipos de la parte de generación de vapor debido a algún problema, mantenimiento o paradas de larga duración por algún motivo.

Desde el tanque, las sales son reconducidas al tanque de sales calientes mediante las bombas que residen en su interior.

La operación de drenaje, en caso de que fuese necesaria, se realizará siguiendo una secuencia determinada.

Al igual que los otros tanques del sistema, el tanque de drenajes está conectado al sistema de balanceo para que así este tanque también esté presurizado permitiendo además la atemperación del equipo desde la atmósfera del tanque caliente.

- Tanque de sales frías

La función de este equipo es almacenar las sales frías a una temperatura de operación de 280°C.

El tanque contiene cuatro bombas de atemperación (10-P-01A, 10-P-01B, 10-P-01C y 10-P-01D) y dos bombas

de atemperación (10-P-02A y 10-P-02B). Para proteger a las bombas que se encuentran en el tanque y al propio tanque se disponen tres transmisores de nivel: 10-LIT-001, 10-LIT-002 y 10-LIT-003.

Las líneas de entrada de sales y recirculación son las que se enumeran a continuación:

- Línea de mínima recirculación de las bombas del receptor
- Línea de mínima recirculación de las bombas de atemperación
- Colector de recogida de los venteos de las líneas de salida de este tanque
- Vuelta de las sales tras el intercambio térmico con el generador de vapor
- Recirculación de sales para precalentamiento del receptor procedente del *downcomer*

El tanque lleva incorporados tres anillos de recirculación interna para una correcta distribución de las sales en el interior del mismo. Uno de los anillos proviene de la línea de mínima recirculación de las bombas del receptor, otro, de las sales que regresan del generador de vapor y el último de ellos de las sales del *downcomer* cuando se realiza el precalentamiento del sistema.

El tanque, al igual que los de sales calientes, está equipado con resistencias eléctricas para mantener las sales en torno a 280°C y evitar que se solidifiquen. Se activará o desactivará el funcionamiento de las mismas según convenga, como se explicará posteriormente. Se pretende que las resistencias actúen conjuntamente con la recirculación de sales para obtener la temperatura adecuada.

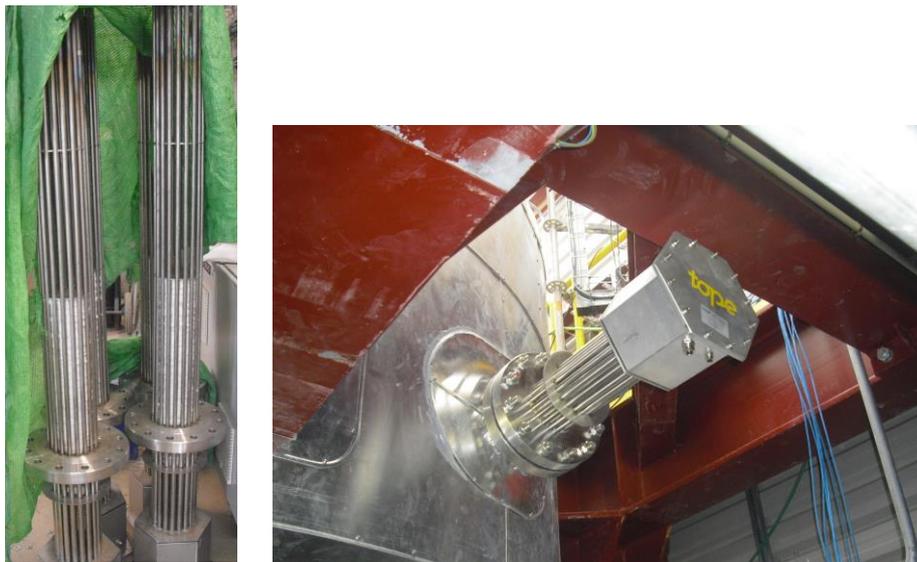


Figura 25. Detalle e instalación de resistencias en tanques.

- Línea de balanceo

Para evitar la entrada de aire húmedo en los tanques y reducir la formación de óxidos de nitrógeno es necesaria la presurización, como se ha comentado, la línea de balanceo permitirá mantener la presión positiva y el equilibrio entre los tanques

El control de la presión se llevará a cabo mediante el controlador 20-PIC-001, de manera que si esta desciende por debajo de 15 mbar de presión se ingresa aire a través de la válvula 20-PV-001. De la misma forma si se incrementa la presión por encima de los 25 mbar la válvula cerrará. Adicionalmente, esta línea dispone de la medida de caudal 20-FIT-001. De nuevo, el tipo de controlador empleado será un PID.

2.7.2 Esquema del sistema

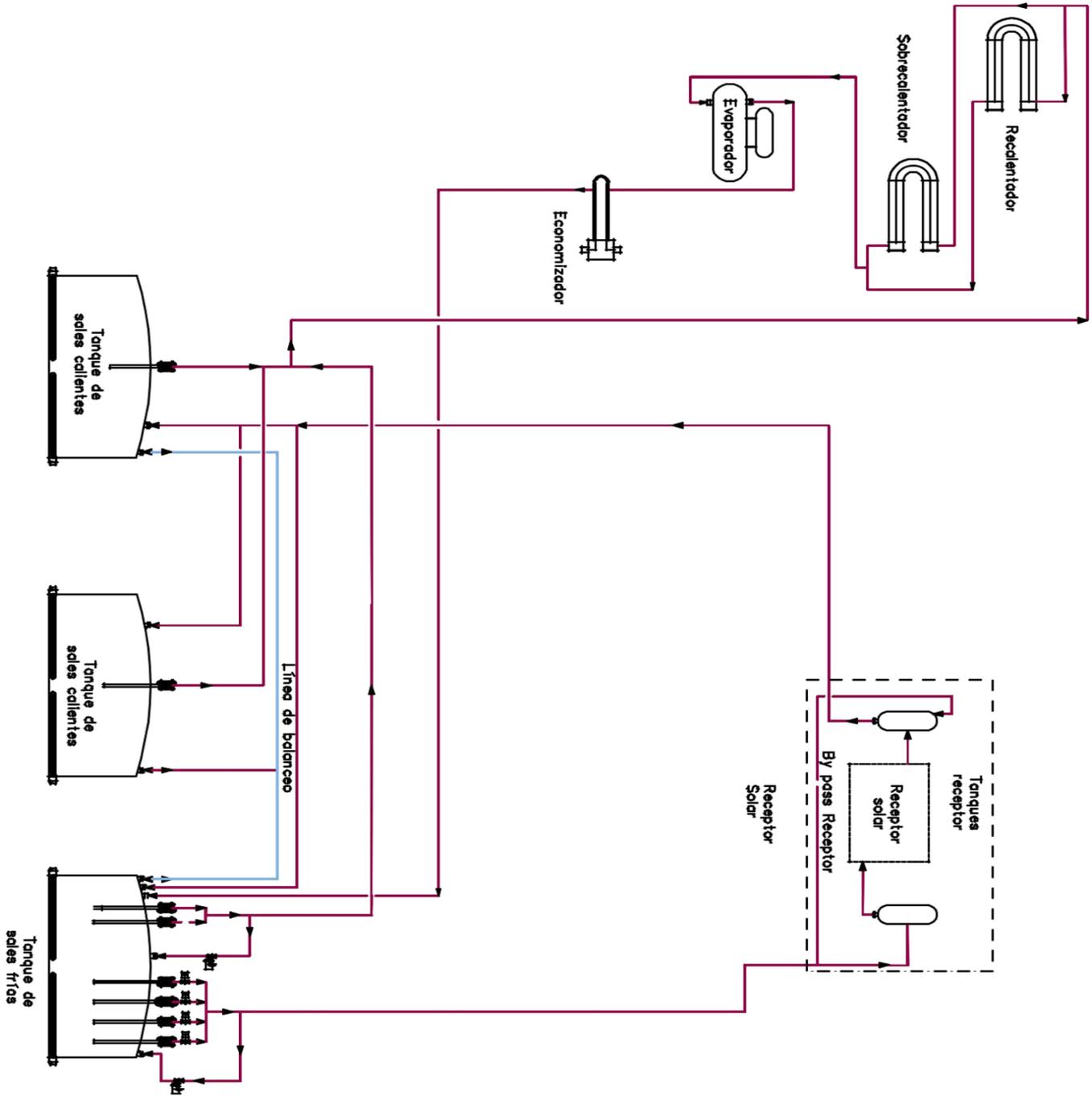


Figura 26. Esquema del sistema de sales.

2.7.3 Codificación de componentes

Existen fundamentalmente dos tipos de codificación para plantas industriales: KKS e ISA. En este proyecto, debido a su simplicidad se empleará codificación ISA, pues refleja menor cantidad de información en P&ID y para los objetivos del trabajo que se va a realizar, conviene una mayor simplicidad en este aspecto. Toda la información que se comentará en cuanto a representación se ha realizado acorde a las normas ISA – 5.3 – 1983 [16] y ANSI/ISA-S5.1-1984 (R 1992) [17], así como bibliografía especializada [18].

Las reglas generales son las siguientes:

- Los instrumentos se representan por códigos y símbolos. El código está conformado por letras y números los cuales identifican la funcionabilidad del instrumento y el lazo a el cual pertenecen.
- Deben emplearse letras mayúsculas par indicar la funcionabilidad del instrumento y números para indicar el lazo a el cual pertenece el instrumento. El número de letras debe ser mínimo y no exceder de 4.
- Cada instrumento se puede representar por un símbolo que normalmente incluyen un círculo dentro del cual se escribe el código de identificación.
- La identificación de la función de un instrumento se hace de acuerdo a la tabla de letras de identificación, para lo cual se deben seguir los siguientes pasos:
 - o La primera letra indica la variable medida: temperatura T, presión P, vibraciones V, etc.
 - o Las letras subsiguientes indican las funciones del instrumento: interruptor de caudal de alto nivel FSH, transmisor de temperatura con indicación TIT, etc.

La norma admite modificaciones, por lo que al inicio de cada proyecto es necesario establecer unos criterios comunes de cara a:

- Concretar excepciones puntuales de la norma ISA aplicadas al proyecto en concreto.
- Establecer un criterio común entre disciplinas para realizar un nombrado de intrumentos, señales y válvulas (“tageado”) ordenado y sin duplicados.
- Integrar ordenadamente la documentación de los paquetes que se subcontratan (turbina, caldera, etc.).

Para el presente proyecto, la única peculiaridad que se introduce es la reserva de dos dígitos, situados al inicio de cada etiqueta (*tag*), para distinguir instrumentación en líneas de aire (20) o en líneas de sales fundidas (10):

Servicio		Función		Secuencial	Subfijo
NN	-	AAA	-	NNN	(A)
10	-	FIT	-	010	B
TES		Caudalímetro		Número	Opcional

Tabla 8. Codificación ISA empleada en el proyecto.

Donde:

N: número

A: letra

() : valor opcional

La información que se recoge en P&ID no son sólo equipos e instrumentos, sino también señales, emitidas por los instrumentos o provenientes del sistema de control distribuido.

Para resumir, y a modo de “típico de simbología”, que es uno de los documentos entregables, en una misma tabla se recogen todos los elementos empleados en la elaboración del P&ID.

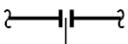
Símbolos generales de instrumentos o funciones	
Tipo de elemento	Símbolo
Instrumento discreto montado en campo	
Display accesible al operador en campo	
Símbolos para líneas	
Conexiones a proceso o suministro de instrumentos	
Señal eléctrica	
Enlace interno del sistema (señal de software)	
Símbolos para válvulas	
Símbolo general de válvula	
Válvula de mariposa	
Posicionador neumático	
Elemento genérico de caudal (ultrasónicos)	
Placa orificio	

Tabla 9. Simbología P&ID.

Los diagramas de tubería e instrumentación se adjuntarán como anexo (Anexo IV: Planos).

3 INGENIERÍA DE INSTRUMENTACIÓN

En todo proceso es completamente necesario, para su buen funcionamiento y marcha, la medición y control de una serie de variables para mantenerlas en torno a una serie de valores deseados. Los instrumentos y sistemas que permiten llevar esta tarea constituyen una unidad en la industria denominada ingeniería de la instrumentación.

Tras haber presentado en el apartado anterior la instrumentación presente en el tanque de sales frías, en este capítulo se detalla el funcionamiento y especificación de los instrumentos indicados en el diagrama de tubería e instrumentación (P&ID). Quedan excluidas de este apartado las válvulas de control y corte, sobre las cuales se hablará en el capítulo 4.

Acorde al P&ID y descripciones del sistema que se han elaborado se tienen la siguiente instrumentación clasificada por variable medida:

- Presión
 - Manómetros en la línea de balanceo, uno por cada bomba del tanque (6).
 - Manómetros en las líneas de impulsión de sales, tanto para bombas del receptor como las del generador de vapor (6).
 - Transmisores de presión en todas las líneas de impulsión de sales. Todos redundantes para el control de presión del flujo mínimo de los dos juegos de bombas (12).
 - Transmisores de presión en la línea de balanceo, con redundancia, para el control sobre la presión mínima en el tanque (3).
- Temperatura
 - Transmisores de temperatura en las líneas de impulsión de sales de las bombas del receptor solar (4).
 - Transmisores de temperatura en los límites de baterías del sistema de generación de vapor y el receptor solar (2).
- Caudal
 - Caudalímetros de sales en cada límite de baterías: generador de vapor y receptor solar (2).
 - Caudalímetro de aire en el límite de baterías del sistema de aire comprimido (1).
- Nivel
 - Niveles por radar para la medición del llenado de sales del tanque (3).

Sumando un total de 39 instrumentos.

Para el desarrollo ordenado de los conceptos, en primer lugar, se expondrán algunas generalidades comunes a todos los tipos de instrumentos y posteriormente, clasificando por variable de proceso medida, se detallarán cada uno de los tipos empleados en este proyecto.

3.1 Generalidades de instrumentos

En un sistema de medida se encuentran generalmente los siguientes elementos bien definidos [19]:

- Elemento primario: montado directamente en el proceso, justo en el punto donde se efectúa la medición, detecta los cambios que se producen en la magnitud de la variable de medida y da una señal de salida que depende del valor de la variable y cuya naturaleza varía de unos instrumentos a otros, incluso para una

misma variable ya que depende del principio usado para efectuar la medición.

- Dispositivo de conexión: sirve de nexo entre elemento primario y el elemento sensible. Puede tener una longitud desde unos milímetros hasta varios centenares de metros. Por el dispositivo de conexión se transmite el valor de la señal producida en el elemento primario hasta el elemento sensitivo. Los dispositivos de conexión más usados son tubos capilares para los sistemas termométricos, tuberías de $\frac{1}{4}$ " o de $\frac{1}{2}$ " en las medidas de presión y de presión diferencial, cable eléctrico de características definidas para cada medición, etc.
- Elemento sensible: alojado generalmente en la caja del instrumento de medida, convierte la señal procedente del elemento primario en otra apreciable mediante lectura directa o bien emite otra señal, cuya variación es análoga a la medición, hasta una estación centralizada donde se encuentra el correspondiente receptor en el que se leerá el valor de la variable medida.

Un ejemplo que ilustra los componentes definidos es el de la Figura 27 en el que se aprecia el montaje de un caudalímetro placa-orificio.

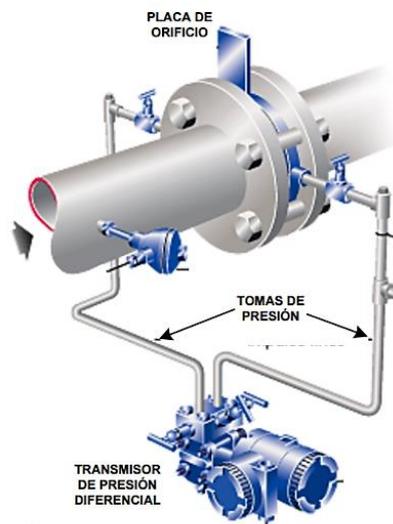


Figura 27. Esquema de transmisor de presión diferencial.

Hay diversos tipos de clasificaciones para los tipos de instrumentos. En nuestro caso, la clasificación se hará en función de la variable medida y dentro de cada una se diferenciarán en función del principio de funcionamiento que tenga cada dispositivo.

3.1.1 Definiciones

Existen una serie de conceptos, comunes a casi todos los instrumentos de medida que relacionan los valores que marcan sobre su escala con los valores reales de la variable medida, expresados en condiciones normalizadas. Abreviadamente diremos que son conceptos que relacionan lecturas (valores que marcan los instrumentos) con valores reales (aplicados a los elementos sensibles y comprobados con patrones):

- Variable de medida: la cantidad física, propiedad o condición que va a ser medida. También se utiliza la palabra medición.
- Rango de medida (*Range*): es el margen de la variable (conjunto de valores de una señal comprendidos entre el valor máximo y mínimo) que el instrumento puede medir conservando su propia precisión. Este sería el rango de calibración del instrumento. La señal que el transmisor envía al controlador puede estar calibrada a un rango de 4 a 20 mA, por lo que el valor máximo del rango se corresponderá al valor de 20 mA de la señal y el valor más pequeño al valor de 4 mA. Para los instrumentos con dial físico (manómetros, termómetros, etc.) este rango ha de ser tal que la medida de las condiciones normales de operación, esté en torno al 60 % del rango, para la indicación de la aguja esté bien centrada.

- Rango con elevación de cero: rango en el que el valor del cero de la variable medida es mayor que el valor mínimo del rango.
- Rango con supresión de cero: rango en el que el valor de cero de la variable medida es menor que el valor mínimo del rango (el cero no aparece en la escala).
- Exactitud: es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.
- Precisión (*Accuracy*): define el límite máximo de error del instrumento bajo condiciones normales de uso. La precisión de referencia (*Reference Accuracy* o *Accuracy Rating*) es el número o cantidad que define un límite que los errores no excederán cuando se emplee un dispositivo en condiciones de operación especificadas. La precisión de referencia incluye los efectos combinados de los errores de histéresis, banda muerta y repetibilidad.

Existen diferentes maneras de expresar la precisión de un instrumento. La forma más habitual es expresando en base a un tanto por ciento del alcance del instrumento. Por ejemplo, Si el intervalo de medida es de 0-100 °C y la precisión es el 1%, el valor real de la temperatura, para una lectura de 80 °C estará comprendido entre $80 \pm (1 \times 100/100) = 80 \pm 1$, es decir, entre 79 y 81 °C.

- Error: es la diferencia algebraica entre la lectura ó el valor transmitido por un instrumento y el valor real de la variable medida. Un error positivo indica que la lectura del instrumento es mayor que el valor real. Cuando la medición se realiza con la participación de varios instrumentos colocados en serie, el valor final de la medida será la suma de los errores inherentes a cada uno de ellos.
- Sensibilidad (*Sensitivity*)- Es la razón (cociente) entre el incremento de la lectura de un instrumento y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Viene dado en % del intervalo de medida.
- Margen, alcance o amplitud intervalo de medida (*Span*): es la diferencia algebraica entre los valores máximo y mínimo del rango.
- Histéresis: es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados de la lectura del instrumento para un mismo valor del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala de la medición en los dos sentidos, ascendente y descendente se expresa en % del alcance (span) de medida.
- Banda muerta (*Dead Band*): es el rango a través del cual una entrada puede ser modificada sin provocar ninguna respuesta observable. Se expresa en porcentaje del alcance de medida. unidir.
- Repetibilidad o fidelidad (*Repeatability*): grado de concordancia entre un número de medidas consecutivas para el mismo valor de las entradas bajo las mismas condiciones de operación y efectuando recorridos completos del rango siempre en la misma dirección. No incluye la histéresis.
- Reproducibilidad (*Reproducibility*): grado de concordancia entre medidas repetidas para un mismo valor de la entrada, y bajo las condiciones operativas normales, durante un periodo de tiempo determinado y empleando recorridos en ambas direcciones. Incluye la histéresis, banda muerta, deriva y repetibilidad.
- Deriva (*Drift*) o Estabilidad (*Stability*): cambio no deseado en la relación salida-entrada a lo largo de un periodo de tiempo. Se habla de la deriva térmica por el efecto que la temperatura ambiente puede tener en la exactitud de un aparato, o de la deriva por envejecimiento por el paso del tiempo.
- Incertidumbre de la medida (*Uncertainty*): es la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al verdadero valor de la magnitud medida. En el cálculo de la incertidumbre interviene la distribución estadística de los resultados de series de mediciones, las características de los equipos (precisión, deriva, etc.) y otros factores.
- Rangeabilidad (*Rangeability*): es la razón entre el valor máximo y el valor mínimo en que un instrumento opera correctamente.

La Figura 28 ilustra las definiciones enumeradas anteriormente:

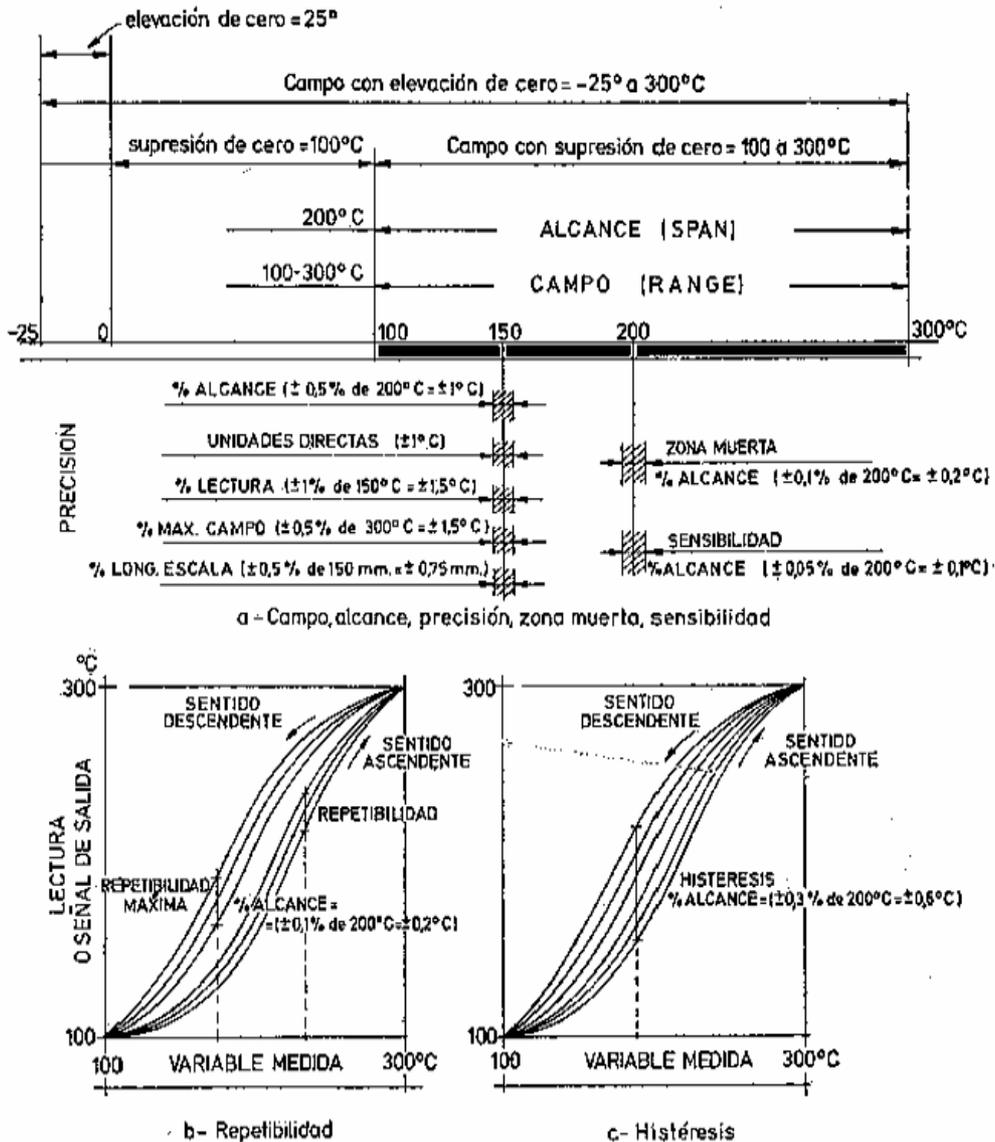


Figura 28. Definiciones asociadas a instrumentación (ejemplo de T°).

3.1.2 Transmisores

Hoy día, en todo tipo de planta el control se efectúa desde salas de control alejadas de las unidades y equipos instalados en campo, hay que contar con sistemas de transmisión, de las mediciones obtenidas localmente por los instrumentos, que lleven dicha información hasta los equipos de adquisición de datos y control situados en dichas salas de control remotas.

A estos efectos se necesitan convertir las diferentes señales generadas por los diferentes instrumentos de medida (nivel, caudal, temperatura, etc.) en señales de aire, eléctricas, etc. adecuadamente codificadas. Esta función la realizan unos instrumentos que reciben el nombre de transmisores.

Existen muchas formas de clasificar los transmisores en función del tipo de señal usada en la transmisión (neumática, electrónica, hidráulica, etc.), de la variable que representa dicha señal de transmisión (presión, temperatura, etc.), de la manera de convertir la variable física en señal de transmisión (equilibrio de fuerzas, movimiento, capacitivos, etc.). Todos los transmisores empleados en el proyecto emplean la señal electrónica normalizada que es de 4 a 20 mA de corriente continua.

Basados en detectores de inductancia, o utilizando transformadores diferenciales o circuitos de puente de Wheatstone, o empleando una barra de equilibrio de fuerzas, convierten la señal de la variable a una señal electrónica de 4-20 mA c.c. Su exactitud es del orden del $\pm 0,5\%$ [20].

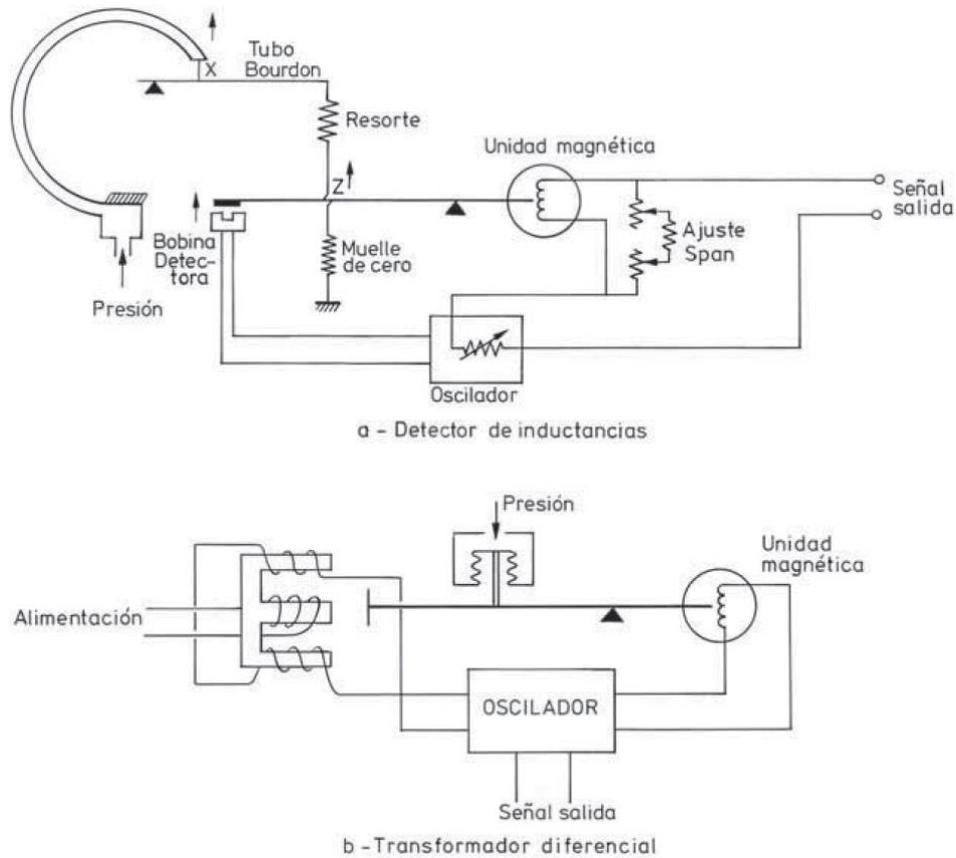


Figura 29. Esquemas de funcionamiento de transmisores.

El transmisor electrónico se alimenta con una fuente de 24 V c.c. y un circuito de dos hilos. El receptor dispone de una resistencia de 250 Ω conectada en los bornes de entrada. De este modo, si la señal de salida del transmisor varía de 4 mA c.c. a 20 mA c.c., se obtendrán las siguientes tensiones en los bornes de entrada al receptor:

$$250 \Omega \times 4 \text{ mA c.c.} = 1.000 \text{ mV} = 1 \text{ V}$$

$$250 \Omega \times 20 \text{ mA c.c.} = 5.000 \text{ mV} = 5 \text{ V}$$

Es decir, de 1 V c.c. a 5 V c.c. y no se pierde tensión en la línea ya que la resistencia de 250 Ω está conectada justo a la entrada del receptor. Para cada tipo de instrumento expuesto, se indicará cuál es la metodología basada para realizar la transformación de la variable medida en la señal 4-20 de entrada al controlador o PLC.

Dada la importancia que tienen los transmisores dentro de la instrumentación por ser elementos claves, no solo del buen funcionamiento de un lazo de control, sino también responsables en la precisión de las medidas que afectan a cálculos, balances, inventarios, etc. es conveniente dar una serie de criterios útiles a tener en cuenta en su selección:

- Temperatura. En este sentido deben ser consideradas tanto la temperatura ambiente como la temperatura máxima de proceso donde dicho transmisor vaya a ser instalado. Nunca debe sobrepasarse la de los elementos sensibles de los transmisores (alrededor de 105°C).
- Presión. Los transmisores de presión deben soportar una sobrepresión del 150% de la máxima presión de operación y los de presión diferencial la máxima presión estática de la línea y la posibilidad de que se aplique accidentalmente una sobrepresión a una de las dos cámaras.
- Condiciones ambientales y peligrosas. Desde el punto de vista ambiental deben soportar humedades desde el 0% al 100% y temperaturas hasta 80°C. deben tenerse en cuenta en su diseño los ambientes corrosivos. En cuanto a la instalación en áreas peligrosas, desde el punto de vista de atmósferas explosivas, los transmisores dispondrán de envolvente antideflagrante o seguridad intrínseca.

- Amortiguamiento. Donde existan vibraciones y/o fluctuaciones del fluido se necesita disponer en los transmisores de posibilidad de amortiguar dichos efectos.
- Elevación y Supresión de cero. En muchos casos se requiere que los transmisores puedan trabajar en aplicaciones con rangos con elevación ó supresión de cero.
- Límites de alimentación y carga. La elección de la alimentación de un transmisor depende de la carga. La mayoría de los transmisores son capaces de operar con unos rangos amplios de variación de carga.

3.2 Medida de presión

En el tanque de sales aparecen dos tipos de medidas de presión:

- Manómetros de aire
- Manómetros en líneas de sales
- Transmisión de presión en líneas de sales.

Antes de comenzar a especificar esta instrumentación es necesario conocer las definiciones de presión acorde a la ISA para conocer a fondo qué se quiere medir [21]:

- Presión absoluta es aquella expresada como una cantidad medida con respecto al vacío absoluto.
- Presión manométrica o relativa: es aquella expresada como una cantidad medida con respecto a la presión atmosférica.
- Vacío es una forma común de expresar las presiones inferiores a la atmosférica que se considera como referencia cero.
- Presión diferencia es la obtenida de dos presiones ejercidas sobre un punto. Al ser una diferencia de presión no tienen origen.

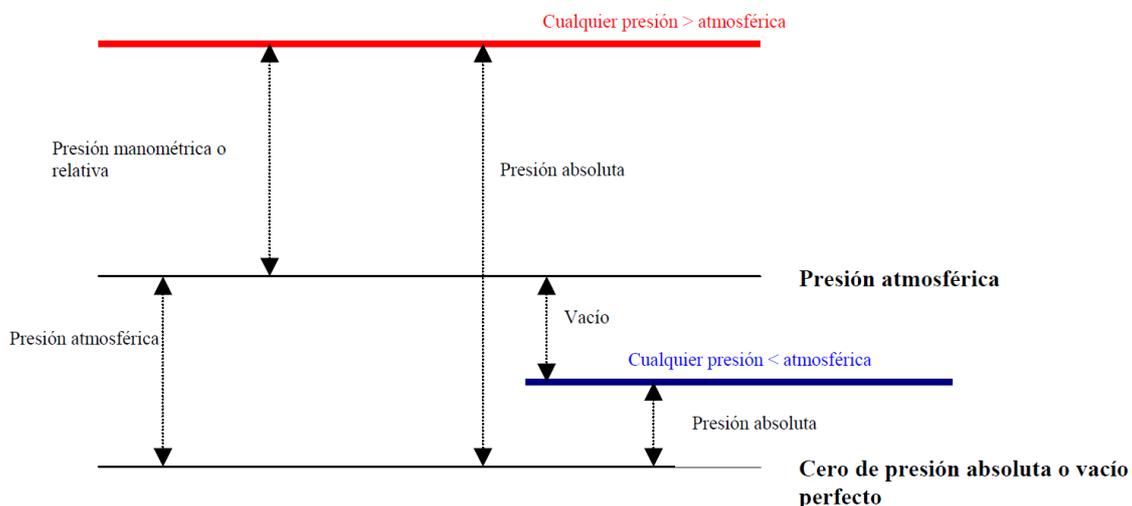


Figura 30. Escalas de presiones. Fuente: ISA

3.2.1 Indicadores (manómetros)

Fundamentalmente existen dos grupos de indicadores de presión:

- De columna líquida
 - o Empleados para medir presión diferencial, este tipo de dispositivo mide la variación de altura en una columna de líquido de densidad conocida en contacto con la presión que se desea medir.

Su rango de medición suele estar comprendido entre 0,2 y 1,2 m.c.a (metros de columna de agua).

- Elásticos
 - Presentan forma de caja circular dentro de la cual una aguja señala los valores de presión medidos. El material de la caja puede variar en función de la aplicación (hierro fundido, aluminio, latón...). Dentro de este tipo de manómetros se pueden encontrar tipo fuelle, diafragma metálico y Bourdon. Sobre este último centraremos nuestra atención.

El manómetro tipo Bourdon (1849, G. Bourdon), capaz de medir presiones elevadas, consiste básicamente en un tubo metálico de sección elíptica curvado en forma de arco cerrado por un extremo y con otro extremo fijo por el que se aplica la presión. Al aplicársele la presión el tubo tiende a enderezarse ligeramente. El movimiento resultante del extremo cerrado del tubo es transmitido a una aguja indicadora mediante un sector dentado y un piñón. La aguja indicadora se mueve sobre una escala graduada [22].

Los manómetros tipo Bourdon pueden ser de tres tipos:

- Hélice
- Espirales
- Con elemento tipo C

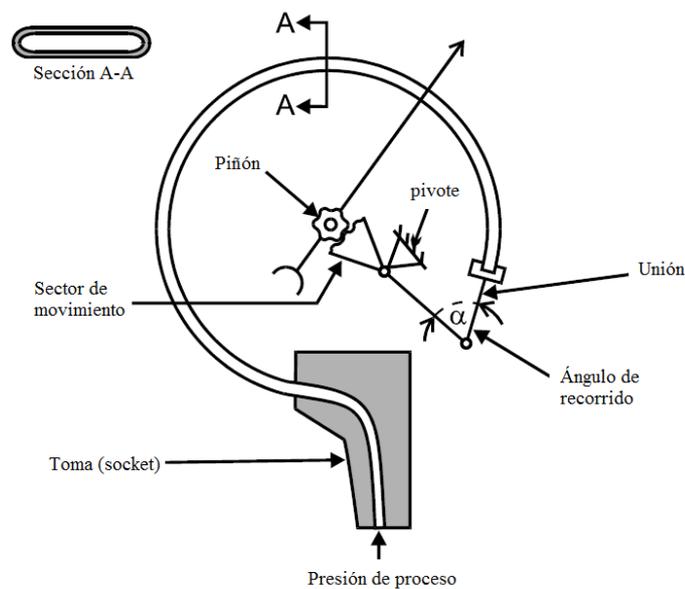


Figura 31. Funcionamiento manómetro Bourdon tipo C. Fuente: [22]

Es el tipo más utilizado ya que sirve para medir presiones ejercidas en un rango comprendido entre 1 y más de 1000 bar g. La presión entra por la conexión y pasa al tubo Bourdon. El tubo tiene una sección elíptica, como se aprecia en la Figura 31, cualquier presión en el tubo, por encima de la externa o atmosférica, produce en el tubo un cambio de su perfil que pasa a tener una sección más circular. El efecto de la presión actuando dentro del tubo tiende a enderezarlo. Con la conexión en una posición fija, la punta del tubo se desplaza una pequeña longitud (1 a 10 mm). Por medio de las articulaciones el desplazamiento del tubo se transmite a la aguja indicadora [23].

Sean del tipo que sean, en función de las condiciones de proceso en el que presten servicio, los manómetros pueden necesitar algún accesorio extra para realizar correctamente su medida. A continuación, se enumeran los más comunes:

- Sifón: en el caso de fluidos a alta temperatura, para evitar daños en el instrumento se coloca un sifón entre el manómetro y la toma de proceso, de manera que el fluido condense y proteger de esta forma el instrumento.



Figura 32. Accesorios para manómetros: sifón, protector sobrepresiones y sello de diafragma.

Fuente: Wika y B-Valve

- Amortiguador de pulsos/relleno: en aplicaciones en las que se prevee que existan vibraciones (impulsión/aspiración de bombas) se suele colocar entre el manómetro y la toma de proceso un amortiguador de pulsaciones. De forma alternativa, se puede rellenar la caja del fluido de un fluido viscoso (normalmente glicerina) para obtener el mismo efecto.
- Protector de sobrepresiones: para casos en los que, en una situación atípica, se prevea la posibilidad de una sobrepresión muy grande que sea susceptible de dañar al instrumento. Normalmente, los manómetros se especifican para una sobrepresión alta y así no tener que añadir este accesorio.
- Para aplicaciones con HTF en centrales termosolares (y todas aquellas que incluyan fluidos muy corrosivos) es necesario emplear manómetros con sello de diafragma de un metal resistente al fluido de trabajo. El espacio entre sello y manómetro ha de estar relleno de un fluido especial (normalmente aceite) para soportar la alta temperatura de operación a la que se someterá al instrumento [24]. A su vez, es fundamental para que se realice una medida sin errores, que no exista espacio entre el diafragma y el manómetro. Esto es debido a que, si la temperatura del HTF decrece, se vuelve más viscoso, lo cual puede provocar problemas en la conexión a proceso, con el consecuente error en la medida. En la Figura 33 se muestra un manómetro diseñado especialmente para trabajar con HTF.



Figura 33. Manómetro para HTF. Fuente: B-Valve.

De cara a nuestras aplicaciones, para la medida en aire no hay que tomar ninguna medida específica para los manómetros salvo la protección contra vibraciones al estar situados en líneas de impulsión de bombas. Irán instalados directamente sobre la línea de balanceo de manera directa.

Para los de sales, es necesario atender a todas las especificaciones señaladas para trabajo con alta temperatura. Si se previese que el acceso no permitiese una visión correcta del dial sería necesario considerar la posibilidad de emplear conexión remota con capilares, la cual se explicará junto con los transmisores.

3.2.2 Transmisores de presión

Una posible clasificación de tipos de transmisor dentro de una misma variable medida puede ser en función del sensor que emplea. Existen diversos mecanismos de sensorización: extensiométricos, resistivos (potenciómetros), magnéticos, etc. Debido al rango de presiones que se van a manejar en esta aplicación el tipo de sensorización empleado será de tipo capacitivo.

El principio de medida de este tipo de dispositivos se basa en la variación de capacidad de un condensador provocada por el movimiento de una de sus placas por la aplicación de presión. Es decir, se tienen dos condensadores; uno con capacidad fija o de referencia y otro de capacidad variable. Se mide la diferencia relativa de capacidad mediante un puente de Wheatstone de capacitancia (Figura 34). El sensor está equipado con un oscilador de alta frecuencia.

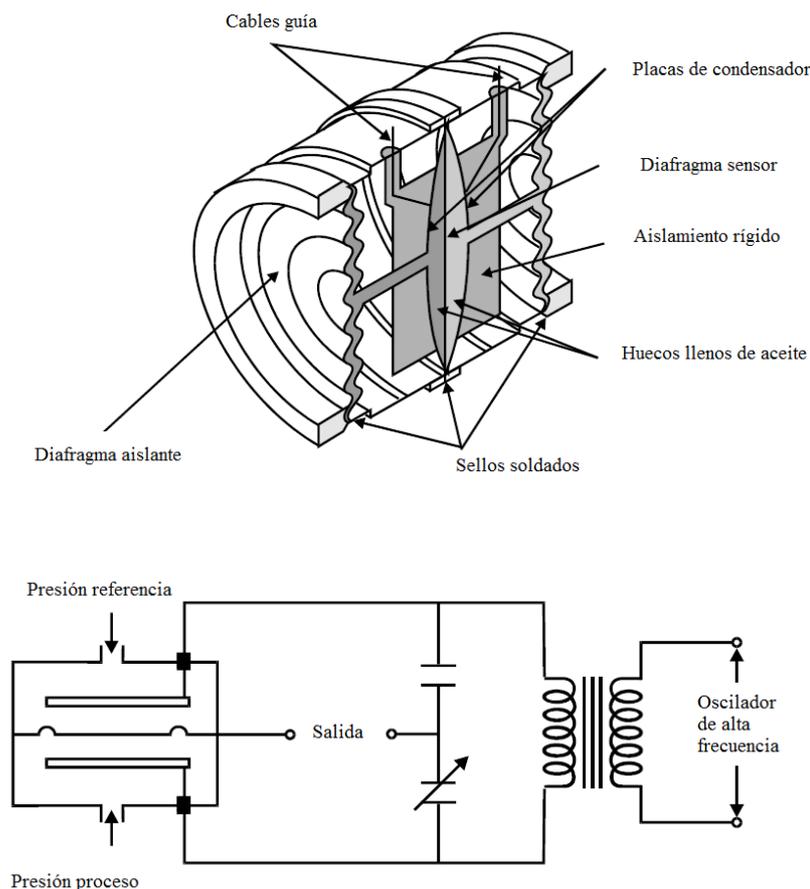


Figura 34. Esquema de transmisor capacitivo y señal de salida. Fuente: Rosemount.

Este principio de medida de presión es bastante preciso y admite un rango amplio de medición (0,8 mbar - 350 bar). Es lineal y tiene una respuesta rápida. Como desventajas cabe mencionar su sensibilidad a la temperatura y vibraciones, limitada capacidad para soportar sobrepresiones y coste [22].

Los transmisores constan, independientemente de su tipo, de tres partes comunes:

- Módulo sensor

Lo compone una membrana en la que se aloja la electrónica del sensor. En los casos descritos, albergarían la circuitería (normalmente circuitos integrados) mostrada en las figuras 19 y 20.

- Electrónica

En esta zona se encuentran implementadas las funciones de ajuste, rango, *damping*, linealización y el tipo de salida (para nuestro caso, 4-20 mA c.c.).

- Conexión a proceso

Cuando las condiciones de proceso son normales, la conexión a proceso se suele realizar con manifold (válvula múltiple de varias vías) a $\frac{1}{4}$ " o $\frac{1}{2}$ " con rosca NPT.



Figura 35. Transmisor de presión con manifold. Fuente: Emerson.

Sin embargo, para las condiciones extremas en las que nos encontramos en sales fundidas se requiere conexión de sello de diafragma, con las mismas características que los empleados para manómetros. Como se adelantó, en transmisores es común el empleo de conexión remota mediante capilar para proteger el diafragma del sensor que alberga el circuito que transmite la señal.



Figura 36. Transmisor de presión con conexión remota. Fuente: Emerson.

Otras condiciones bajo las que sería necesario considerar el uso de sellos son:

- Necesidad de conexiones sanitarias.
- Necesidad de limpiezas frecuentes de líneas (evitar contaminación entre diferentes recetas o coladas)
- Necesidad de evitar que el fluido pueda solidificarse en el transmisor o tubería.

3.3 Medida de temperatura

Para las aplicaciones de temperatura del presente trabajo se emplearán mediciones con termopares, que junto con las termorresistencias constituyen los dos dispositivos más populares para transmisión de temperatura.

Para explicar cómo son estos dispositivos, en primer lugar, se explicarán los principios físicos en los que se basa y a continuación se detallarán las soluciones de los diferentes fabricantes a nivel comercial.

3.3.1 Principio de funcionamiento

Un par termoeléctrico es un conjunto de dos conductores metálicos diferentes “A” y “B” unidos por ambos extremos, cuyas uniones se mantienen a temperaturas diferentes. En estas condiciones existe entre sus extremos una diferencia de potencial denominada fuerza electromotriz termoeléctrica (efecto Seebeck) que puede medirse cortando uno de los conductores y uniendo sus extremos a un voltímetro de gran impedancia. La fuerza electromotriz depende exclusivamente de la naturaleza de los metales y de la diferencia de temperatura de las dos uniones o soldaduras. En la práctica, una de estas soldaduras se mantiene a la temperatura de referencia (soldadura fría) y la otra se encuentra a la temperatura que se desea medir (soldadura caliente). Para entender el modo en el que se produce la medición en este tipo de dispositivo es necesario conocer tres efectos que los fundamentan: efectos Seebeck, Peltier y Thomson [25].

Efecto Seebeck

Debido a Thomas J. Seebeck (1821), este físico alemán descubrió que se produce fem debido a un proceso puramente térmico en un circuito compuesto por dos metales diferentes cuyas soldaduras se mantienen a diferente temperatura.

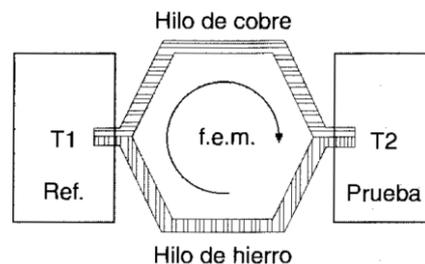


Figura 37. Esquema de efecto Seebeck

La fem del circuito se denomina fem de Seebeck. Si se mantiene constante la temperatura de la soldadura de referencia T_1 , la fem es función únicamente de la temperatura de prueba T_2 . Esta fem se produce debido a que la densidad de electrones libres en los metales difiere de unos a otros y para un metal en concreto depende de la temperatura. Cuando se unen dos metales diferentes para formar soldadura, los electrones se difunden del uno al otro actuando la soldadura como origen de fem.

Si tomamos como referencia la figura 37 la fem generada fluye del cobre al hierro en la dirección del extremo caliente, y del hierro al cobre en la dirección del extremo frío. Este flujo de corriente se debe a dos fuentes combinadas que se detallarán más adelante: fem Peltier y fem Thomson. Esta fem se puede obtener por medio de la siguiente integral:

$$\varepsilon_{AB} = \int_{T_1}^{T_2} (Q_A - Q_B) dT$$

Donde:

ε_{AB} : fem producida por el par [mV]

T_1, T_2 : temperaturas [K]

Q_A, Q_B : constante de transporte térmico de los metales

Las constantes Q_A, Q_B son aproximadamente independientes de la temperatura, por lo que existe una relación lineal de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{AB} = \alpha (T_2 - T_1)$$

Donde:

α : constante del par [mV/K]

Efecto Peltier

Debido al físico francés Jean Charles Peltier (1834), este efecto consiste en la liberación o absorción de calor en una unión de dos metales cuando hay flujo de corriente, es decir, es el efecto inverso al de Seebeck. Debido a las diferentes propiedades de conducción electro-térmica de los metales, una de las uniones se calienta y la otra se enfría, lo cual indica que hay una diferencia de potencial en la unión de los metales.

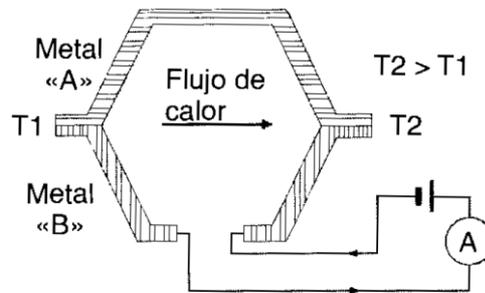


Figura 38. Esquema de efecto Peltier

Si la corriente se hace fluir en sentido contrario a esa fem se produce un exceso de calor, mientras que, si la corriente se hace fluir en el mismo sentido que la fem generada, aparece un efecto de enfriamiento.

Empíricamente se demuestra que el efecto Peltier producido en cualquier soldadura es proporcional a la cantidad de electricidad que la atraviesa, y que se invierte el sentido del flujo calorífico cuando se invierte también el sentido de la corriente eléctrica. Los julios de energía calorífica absorbida o liberada en una soldadura de dos metales "A" y "B", por culombio de electricidad transportada a través de ella, se denomina fem Peltier.

$$\pi_{AB} = \frac{(\text{julios})\text{Efecto Peltier}}{(\text{Culombios})Q}$$

Efecto Thomson

Debido a William Thomson (conocido como Lord Kelvin, 1854), este efecto muestra que en un hilo cuyos extremos se mantienen a diferente temperatura, la densidad de electrones varía de un punto a otro. Cada elemento de hilo de temperatura no uniforme es un origen de fem. Cuando se mantiene una corriente en un hilo de temperatura no uniforme, se libera o se absorbe calor en todos los puntos del hilo, y este efecto es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa una parte del hilo y a la diferencia de temperatura entre los extremos de esa parte.

Si una parte infinitesimal del hilo "A" tiene una diferencia de temperatura dT el número de julios de energía calorífica absorbidos o liberados de esa longitud de hilo, por culombio de electricidad transportada, se

denomina fem Thomson y se conoce como:

$$\sigma_A dT = \frac{\text{julios (efecto Thomson)}}{\text{culombios (Q)}}$$

Donde el coeficiente σ_A se denomina calor específico eléctrico. En un hilo cuyos extremos se encuentran a las temperaturas T_1 y T_2 la fem debida al efecto Thomson viene dada por:

$$\int_{T_1}^{T_2} \sigma_A dT$$

Medida con termopar

Una medida con termopar será adecuada cuando la suma de las fem debidas al efecto Peltier y Thomson sea suficiente para mostrar una variación proporcional a la temperatura. En el esquema mostrado, M es la conexión caliente y N la fría. “A” es el hilo positivo, “B” el negativo, G el galvanómetro y por último “X” e “Y” los cables de extensión que se comentarán a continuación.

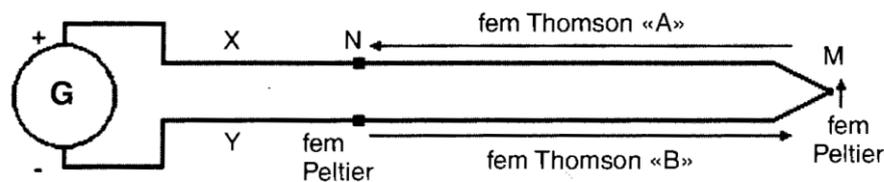


Figura 39. Esquema de termopar

Para que no haya errores en la medida, la temperatura de la junta fría ha de ser constante o bien efectuar una compensación de la misma. En el punto N los hilos de compensación X e Y se encuentran en contacto con los A y B cerrándose el circuito a través del galvanómetro. En esta situación se producen dos fem de signo contrario en el punto N debidas al efecto Peltier. Si se produce una fluctuación de temperatura en este punto, estas fem variarán ocasionando un error en la medida de temperatura del punto M donde se haya la unión caliente del termopar. Por ejemplo, si la temperatura de la junta fría se eleva, y se mantiene constante la de la unión caliente, la fem entre los hilos A y B se verá afectada provocando un error en la medida, de ahí la necesidad de compensar la unión fría o mantener su temperatura constante.

No obstante, si se calentase uno o ambos hilos del termopar, o de su prolongación, el termopar seguiría midiendo la temperatura correspondiente a la junta caliente. Es decir, la fem generada por el termopar se debe solamente a la diferencia de temperatura entre las juntas fría y caliente siendo la temperatura indicada la perteneciente a la junta caliente del sistema.

3.3.2 Tipos de termopar

Los termopares van encapsulados en tubos de material adecuado al entorno en el que se realizará la medición (normalmente acero inoxidable). La unión caliente puede estar unida al extremo de la funda de protección o aislada de la misma, para que no exista comunicación a tierra.

En función del material empleado (metales puros o aleación), se definen los tipos de termopares a los cuales se le asigna una letra, tal y como se recoge en la siguiente tabla [26]:

Tipo	Materiales	Rango normal (°C)
J	Hierro – Constantan	-190 ÷ 760
T	Cobre – Constantan Cobre – (Cobre-Níquel)	-200 ÷ 370
K	Cromel – Alumel (Cromo – Níquel) (Aluminio – Níquel)	-190 ÷ 1260
E	Cromel – Constantan	-100 ÷ 1260
S	(90 % Platino + 10 % Rodio) Platino	0 ÷ 1480
R	(87 % Platino + 13 % Rodio) Platino	0 ÷ 1480

Tabla 10. Tipos de termopar.

Cada uno de ellos tiene sus características particulares tales como rango, linealidad, sensibilidad, etc. En cada uno de los tipos se pueden seleccionar diversos grosores de hilo, dependiendo de la aplicación. Si se utilizan grosores pequeños de hilo no se podrán alcanzar los rangos de temperatura que muestra la tabla anterior. En todos los termopares existen ciertas características que los identifican, entre las que se pueden citar como más importantes [26]:

- El material que aparece en primer lugar corresponde al positivo cuando la temperatura medida es superior a la temperatura de referencia.
- El hilo negativo siempre es de color rojo (en los cables de extensión).
- En los termopares tipo “K”, el hilo negativo es ligeramente magnético.
- En los termopares tipo “S”, el hilo negativo es más blando que el positivo.

En la siguiente figura se muestran las curvas de voltaje en función de la temperatura de los termopares para una temperatura de referencia de 0 °C. Se pueden apreciar algunas de las peculiaridades más importantes.

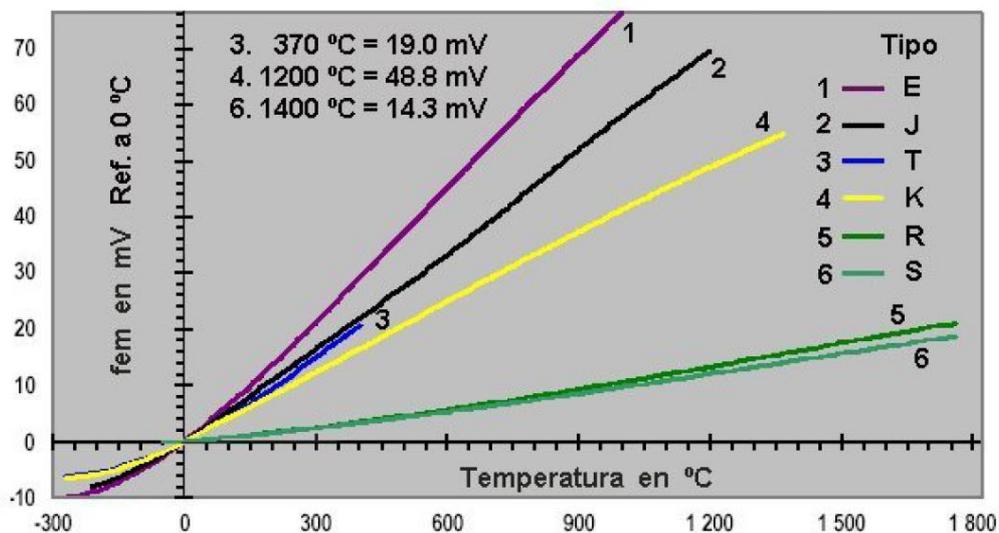


Figura 40. Curvas de voltaje en función de Tª.

Los tipos de termopares más empleados en la industria son los T, K y S. Como puede verse en la figura, los termopares tipo “T” y “K” tienen una gran pendiente, y por tanto gran sensibilidad, por lo que facilitan la medida ante un cambio de temperatura. El tipo “S” tiene mucha menos pendiente y como consecuencia menos sensibilidad, aunque a cambio admiten un mayor rango de medida. Como resumen de lo anterior, la utilización de los termopares mencionados se realiza de acuerdo al siguiente criterio [26]:

- Tipo “T”. Bajas temperaturas y sobre todo si se trata de temperaturas negativas.
- Tipo “K”. Uso generalizado para temperaturas positivas hasta 800 – 900 °C.
- Tipo “S”. Solo para altas temperaturas.

Acorde a la norma ISA 96.1, los límites de error para estos termopares (unión fría a 0 °C) sin tener en cuenta los errores de medida del sistema son los siguientes:

Tipo de termopar	Error
T (0 – 350 °C)	$\pm 1.0 \text{ °C}$ ó $\pm 0.75 \%$ de la medida
K (0 – 1250 °C)	$\pm 2.2 \text{ °C}$ ó $\pm 0.75 \%$ de la medida
S (0 – 1450 °C)	$\pm 1.5 \text{ °C}$ ó $\pm 0.25 \%$ de la medida

Tabla 11. Límites de error estándar para termopares.

Sobre los cables de extensión, en la práctica el termopar termina en la cabeza de conexión. Sin embargo, la unión fría o de referencia suele estar ubicada en el instrumento de medida. Las líneas de extensión son necesarias para prolongar los termopares hasta el punto de medida, en el que la unión fría no está sometida a variaciones incontroladas de temperatura. En el siguiente esquema se muestra la configuración descrita:

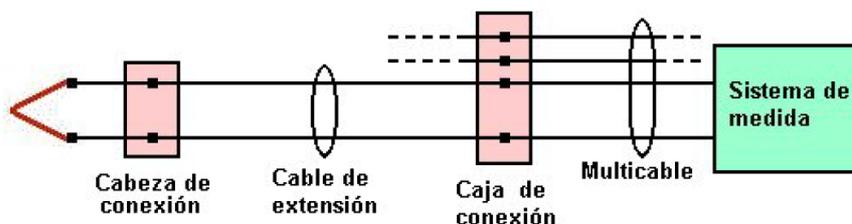


Figura 41. Esquema de conexionado de termopares.

Para las líneas de impulsión de sales donde van colocadas las temperaturas, se emplearán termopares tipo K, que cumplen las condiciones de servicio en base a la información proporcionada anteriormente. Como peculiaridad, comentar que la unión de las vainas o termopozos habrá de ser soldada debido a que se trabajan con sales fundidas. Este elemento se comentará a continuación.

3.3.3 Partes constructivas y montaje

Las partes constructivas de un transmisor de temperatura con termopar son las siguientes [27]:

- Termopozo: es la parte que está físicamente en contacto con el fluido. Habrá de tener una inserción correctamente calculada para que el estrés (térmico o de otro tipo) provocado por el bañado del fluido de proceso no dañe el dispositivo.



Figura 42. Elemento primario soldado (catálogo e instalación).

- Transmisor: es la parte que aloja las uniones y la electrónica adecuada para transmitir la señal 4-20 mA. Los fabricantes ofrecen numerosas combinaciones para satisfacer las condiciones de servicio necesarias en cada caso.



Figura 43. Transmisor de temperatura (catálogo e instalado)

3.4 Medida de caudal

Las medidas de caudal que son necesarias para el tanque son la entrada de aire por la línea de balanceo y las medidas en sales fundidas, aplicaciones diametralmente opuestas en cuanto a agresividad de condiciones. Para la línea de aire se empleará medición con placa-orificio, la más económica y utilizada y para las sales fundidas medición con caudalímetro ultrasónico.

3.4.1 Medición con placa orificio

La placa orificio es el dispositivo más sencillo y económico empleado en la detección de caudal. Estos elementos primarios de caudal son placas planas con un grosor que va desde 1/6" hasta 1/4" de pulgada. Van instaladas normalmente entre un par de bridas instaladas en un tramo recto de tubería para evitar perturbaciones y patrones de flujo provocados por válvulas u otros elementos.

Fundamentalmente se emplean tres tipos de placa orificio: concéntricas, excéntricas y segmentales, siendo el primero el tipo más común. Como se aprecia en Figura 44, el tipo concéntrico es equidistante al diámetro interno de la tubería en la que va instalado. El borde del orificio puede ser biselado o no en función del tipo de servicio que tenga la línea. En el caso de aplicación bajo estudio, el borde no será biselado, ya que se pretende medir aire en ambas direcciones de la línea de balanceo del tanque.

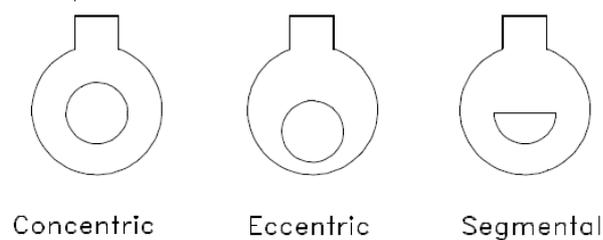


Figura 44. Tipos de placa orificio. Fuente: ISA.

A la altura del orificio, el fluido converge hacia el mismo produciéndose un aumento de velocidad hasta alcanzar un punto máximo, al mismo tiempo que la presión decae hasta un valor mínimo (*vena contracta*). Tras pasar el orificio, el fluido diverge recuperando de nuevo su velocidad. La presión se recupera al 60-80% del valor de entrada, es decir, la caída de presión no se recupera por completo siendo siempre menor la presión de salida que la de entrada. La medición de presión a la entrada-salida del orificio proporciona una medición de caudal por presión diferencial.

El funcionamiento de los otros dos tipos de orificio es exactamente igual al descrito. El medio círculo se emplea para evitar el daño por inclusiones aguas arriba del elemento primario cuando se instala en tubería horizontal. El medio orificio se sitúa arriba o abajo en función del fluido de proceso de cara a obtener una medición más precisa. El orificio excéntrico se emplea también de cara a prevenir daño por inclusiones aguas arriba.

Como desventajas de este dispositivo señalar la caída de presión que se produce y que este método de medida está sujeto a erosión en el material con la consiguiente pérdida de precisión en la medida [28].

También añadir que en función de si presta servicio en líquidos o gases, habrá de añadirse un orificio de venteo o drenaje respectivamente. En el caso de líquidos, se concreta este aspecto de cara a evitar que se formen burbujas que dificulten la medición y en el caso de gas, de manera similar, para drenar eventuales condensados que se puedan formar. En caso de medición de vapor es necesaria la instalación de un pote que recoja el condensado que se pudiera formar.

3.4.1.1 Dimensionado de placa orificio

El objetivo de dimensionar la placa orificio es el cálculo del diámetro del orificio: d , el cual se proporciona a través del parámetro β [29]:

$$\beta = \frac{d}{D}$$

Siendo D el diámetro interior de la línea en la que va instalado el dispositivo. En primer lugar, se desarrollarán las ecuaciones que fundamentan el dimensionamiento de este parámetro y posteriormente se mostrará el desarrollo que marca la norma ISO 5167, el cual es el exigido por normal para la especificación de elementos primarios de caudal. Los programas de cálculo que facilitan los fabricantes llevan implementadas estas ecuaciones.

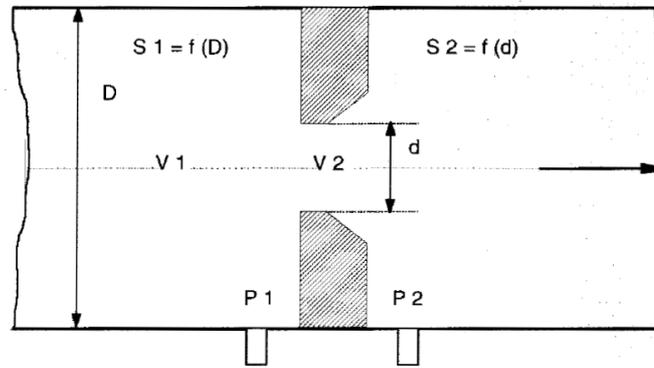


Figura 45. Esquema de placa orificio. Fuente: ISA.

Según la ecuación de continuidad:

$$S_1 V_1 = S_2 V_2$$

Aplicando el teorema de Bernouilli a las secciones de paso:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

La altura potencial Z es la misma en ambos lados de la ecuación, así como la densidad del producto y la aceleración de la gravedad. De esta manera se puede simplificar hasta otra ecuación de la forma:

$$V_1^2 - V_2^2 = K (P_1 - P_2)$$

Sustituyendo velocidades y reordenando términos se obtiene la ecuación que ya se presentase al inicio del capítulo de medición de presión [29]:

$$\frac{Q^2}{S_2^2} + \frac{Q^2}{S_1^2} = K (P_1 - P_2) \rightarrow Q^2 \left(\frac{1}{S_2^2} + \frac{1}{S_1^2} \right) = K \Delta P$$

$$Q = K \sqrt{\Delta P}$$

De acuerdo a la norma ISO, se toman en consideración algunos detalles para realizar un cálculo más preciso. La ecuación para calcular el caudal en masa por medio de placas orificio es la siguiente:

$$Q_M = C E \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 g h \rho}$$

Donde:

- C, E y ε son parámetros específicos de cada placa.
- Q_M : caudal [kg/h]
- h : presión diferencial [m.c.a]
- d : diámetro interior de la tubería [mm]
- ρ : densidad del fluido de proceso [kg/m³]

En la práctica los cálculos para este elemento primario son bastante más elaborados. La implementación práctica de estos cálculos para el caso que se contempla se detalla en el Anexo I. Dimensionado de placa orificio.

3.4.1.2 Montaje y características de transmisor

El tipo de transmisor empleado es de presión diferencial y sus principios de funcionamiento y transmisión de señal son exactamente los mismos que se explicaron para la medición de presión. En el caso que aplica, se trata de una línea de aire comprimido

La conexión a proceso del elemento primario se suele realizar mediante brida como se comentó antes. Como es de suponer, en función del servicio, habrá una serie de consideraciones a tener en cuenta en cuanto a la instalación del transmisor. Para medición de gases, que es el servicio en el que se mide caudal con placa orificio en este proyecto también hay que considerar una serie de ítems.

Uno de los requerimientos básicos para la medida de caudal en gases es que los tubos de conducción desde las bridas de orificio hasta el transmisor, no tengan fugas ni se formen bolsas de líquido en su recorrido, a fin de evitar la pérdida de presión en alguna de sus ramas.

La conexión con la tubería de proceso, tiene que tener inclinación en los tramos rectos evitando puntos bajos que puedan llenarse con líquido procedente de la condensación y formar sellos hidráulicos. En general, si se mide gas seco se puede instalar el transmisor por encima o por debajo de la tubería de proceso. Para el caso de vapor, es preferible por encima y en cualquier caso utilizando potes de condensado que recojan el condensado que se pudiese formar. Para gases húmedos en general, se debe instalar en un tramo donde la dirección del flujo sea hacia abajo, para facilitar el arrastre de gotas.

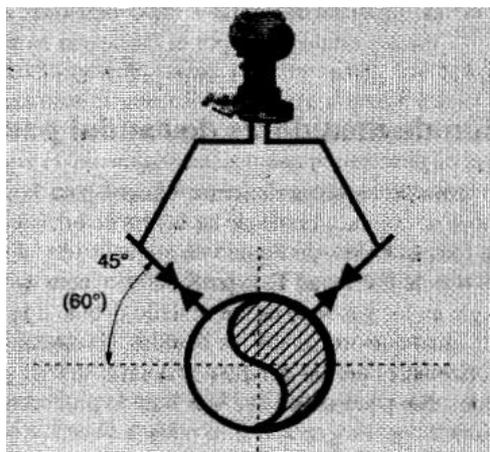


Figura 46. Montaje para medición en gases secos.

El tipo de montaje más habitual para gases secos es el que se muestra en la Figura 46. A pesar de no existir posibilidad de condensación no sería estrictamente necesaria la condición de inclinación en las tuberías de unión, pero no está de más colocar todos los montajes con inclinación para evitar sorpresas durante la operación de la planta [31].

El transmisor se conecta a las tuberías de unión mediante manifold de 2 vías y 5 válvulas. De las válvulas del manifold, 3 son de regulación de caudal y las otras 2 son venteos para realizar la conexión al proceso con seguridad, como se refleja en la Figura 35. Por último, en la se muestra como sería un medidor de caudal completo con todas sus partes:



Figura 47. Caudalímetro con placa orificio montaje directo. Fuente: B-Valve.

3.4.2 Medición con placa orificio

Para la medida en la línea de sales que va a hacia el receptor solar, no sería adecuado la utilización de placa orificio debido a las condiciones extremas de las sales, pues estas podrían dañar el material y no permitir hacer la medición adecuadamente. Para esta aplicación, es más conveniente la utilización de otro principio de medición más conveniente: medición de caudal por ultrasonidos.

Este tipo de medidores tiene la ventaja de que no ocasiona pérdida de carga en la línea, no tiene partes móviles y no necesita prácticamente mantenimiento. Entre sus desventajas cabe destacar que no es posible calibrarlo en campo, por lo que necesita un medio de contraste complejo.

Pueden existir dos principios de medida: efecto Doppler y por tiempo de tránsito.

- Por efecto Doppler

Estos dispositivos emplean el conocido efecto Doppler, el cual establece que la frecuencia del sonido varía si existe movimiento relativo entre la fuente y el receptor. La magnitud del cambio de frecuencia que se produce es una indicación de la velocidad de la fuente.

En la práctica, el caudalímetro Doppler se conforma por un *tubing* en el cual se alojan dos cristales piezométricos; uno que actúa de transmisor y otro de receptor, con todo el ensamblaje en la pared de la línea en la que se coloca el instrumento, como se aprecia en la Figura 48.

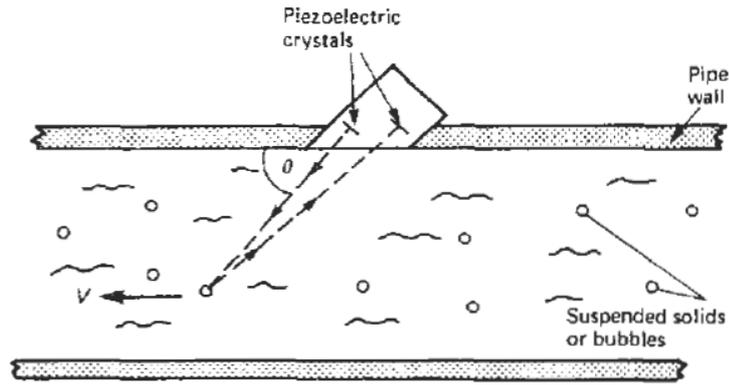


Figura 48. Principio de funcionamiento de medidor Doppler

El elemento transmisor envía ondas de sonido con un cierto ángulo θ a una frecuencia F_1 hacia el flujo que circula por la línea. Si el fluido contiene partículas, burbujas o cualquier tipo de discontinuidad, parte de la energía transmitida volverá y se reflejará en el receptor. Si el fluido viaja a una velocidad V , la frecuencia del sonido reflejado que revierte en el receptor F_2 , se puede expresar de la siguiente manera:

$$F_2 = F_1 \pm 2V \cos\theta \frac{F_1}{C}$$

Donde C es la velocidad del sonido en el fluido. Si se reordenan términos:

$$V = \frac{C(F_2 - F_1)}{2 F_1 \cos\theta}$$

Con lo que se observa que la velocidad del producto es proporcional al cambio de frecuencia.

- Por tiempo de tránsito

A diferencia de los medidores Doppler, estos caudalímetros basan su funcionamiento en la transmisión de un pulso ultrasónico a través del flujo, por lo que no dependen de inclusiones o discontinuidades en el fluido de proceso.

El principio de operación es la transmisión de un pulso ultrasónico entre dos puntos, primero en la dirección del flujo y luego en la opuesta. En cada caso, el tiempo que tarda en viajar la onda del origen al destino se verá modificado por la velocidad media del flujo y la diferencia entre ambos tiempos de tránsito se puede expresar como una relación directamente proporcional a la velocidad del fluido, obteniéndose por tanto el caudal que circula por la línea.

En la práctica, la onda no se genera en la dirección del fluido, sino con un cierto ángulo con respecto a esta, como se muestra en la Figura 49. Si se definen los tiempos de tránsito aguas abajo y aguas arriba como T_1 y T_2 respectivamente, pueden ser expresados de la siguiente manera:

$$T_1 = \frac{D}{C + V} \quad T_2 = \frac{D}{C - V}$$

Donde C es la velocidad del sonido en el fluido y V la velocidad del fluido. Se tendría que:

$$T = T_1 - T_2 = \frac{2DV}{(C^2 - V^2)}$$

Al ser V^2 mucho más pequeña que C^2 , puede ser despreciado. Así mismo, es conveniente poner la expresión de V en función de la frecuencia y eliminar la dependencia de la velocidad del sonido. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se puede llegar a la siguiente expresión:

$$F_1 - F_2 = \frac{2\bar{V}\cos\theta}{D}$$

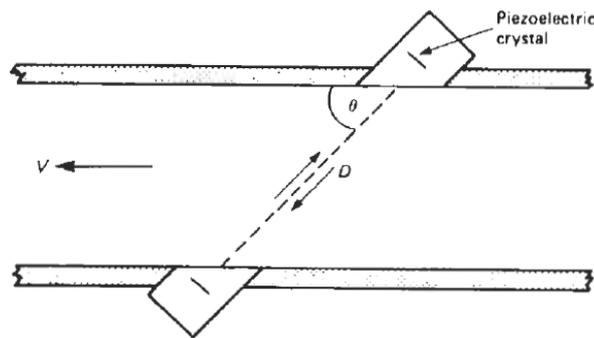


Figura 49. Funcionamiento de medidor *transit-time*.

Como puede apreciarse, en ambos casos el resultado es una diferencia de frecuencias, las cuales, son calculadas por un convertidor electrónico que proporciona una señal analógica de salida proporcional al caudal del fluido de proceso.

Como se ve en la Figura 49 se emplean transductores de cerámica piezoeléctrica tanto para transmisión y recepción de la onda sónica situados en el exterior de la tubería y de forma separada un transmisor/convertidor electrónico. Los transductores consisten básicamente de un cristal piezoeléctrico dimensionado adecuadamente para las frecuencias deseadas (normalmente 1-5 MHz para líquidos y 0,2-0,5 MHz para gases) [32]. En la Figura 50 se aprecia el montaje de uno de los transductores y el montaje del caudalímetro completo:

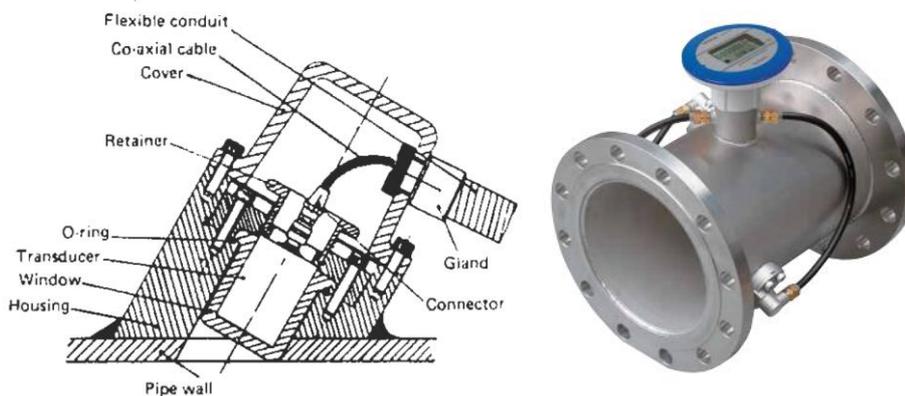


Figura 50. Montaje de transductor y caudalímetro ultrasónico para gases. Fuente: [32] y B-Valve.

3.5 Medida de nivel

Las medidas de nivel que se van a implementar en el proyecto se corresponden a las situadas en lo alto del tanque para determinar el nivel de llenado del tanque de sales. Como se verá más adelante, las dimensiones de este tanque son inmensas (posee 50 m de diámetro y 14 m de alto) por lo que la medición de nivel no se puede hacer tal y como se haría en un tanque de aguas mediante un método basado en presión diferencial.

El sistema de medición elegido será el denominado como medición de nivel por radar. Este sistema se basa en la emisión continua de una onda electromagnética, típicamente dentro del intervalo de los rayos X (10 GHz). El sensor está situado en la parte superior del tanque y envía las microondas hacia la superficie del líquido. Una parte de la energía enviada es reflejada en la superficie del líquido y la capta el sensor. El tiempo empleado por las microondas es función del nivel en el tanque.

Una técnica empleada es utilizar una onda continua modulada en alta frecuencia (por encima de los 10 GHz), de modo que se detecta la diferencia de frecuencia entre la señal emitida y el eco

recibido. La técnica recibe el nombre de FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave* – Onda continua modulada en frecuencia). La diferencia de frecuencias es proporcional al tiempo empleado por estas señales de transmisión y retorno, es decir, al nivel. Y así:

$$d = \frac{v \cdot dt}{2}$$

Con:

$$v = \frac{c}{\sqrt{e}}$$

Siendo:

d : distancia del emisor al líquido

v : señal de velocidad

dt : tiempo de recorrido

c : velocidad de la luz

e : constante dieléctrica

Un oscilador de estado sólido genera una frecuencia de barrido de 10 a 11 GHz y enfoca la señal sobre el líquido por medio de una antena. Esta puede ser de disco parabólico, que dirige las señales en una amplia área, o de cono que las contiene en un haz más estrecho.

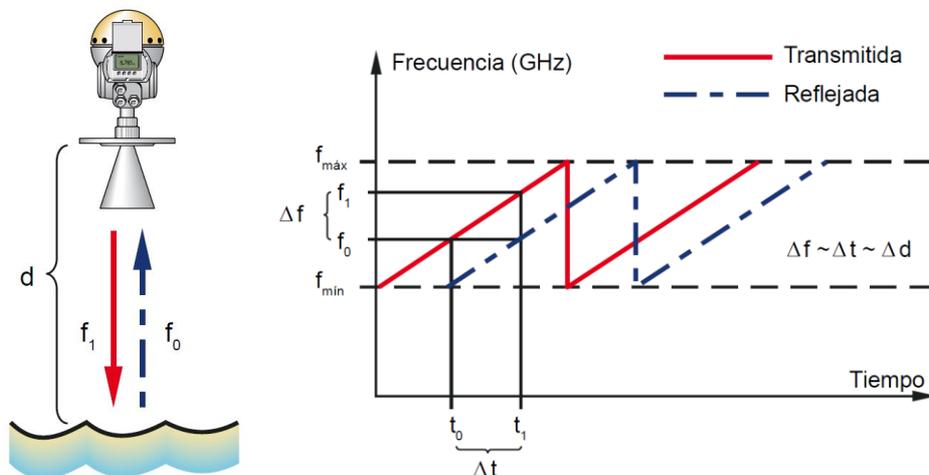


Figura 51. Señales en un sistema radar FMCW.

Acorde a la figura, si se denomina K a la relación de variación de frecuencia, ($K = \Delta f / \Delta t$), la relación df / K

proporciona el tiempo T_r del cual se puede obtener la distancia desde el cabezal del sensor a la superficie de líquido en el tanque:

$$d = \frac{c \cdot T_r}{2}$$

Si el tanque sufriese movimiento de líquido (olas o perturbaciones similares) podría aparecer una frecuencia Doppler, lo cual podría falsear la medida. En el caso de este tanque, las sales no están sujetas a este tipo de fenómeno.

El sistema de medida del nivel tipo radar es adecuado para asfaltos, parafinas y productos muy densos o viscosos, que no sean homogéneos y sufran estratificaciones. Es un método de medida no invasivo, inmune a los gases y vapores; apropiado para trabajar en recipientes presurizados a elevadas presiones, vacío y en presencia de polvos.

Los cambios en la composición, densidad, viscosidad y constante dieléctrica no afectan al funcionamiento del sistema.

Las características típicas de los medidores de radar son [33]:

- Repetibilidad + 1 mm.
- Exactitud para tanques en general + 5 mm.
- Exactitud para tanques de entrega de productos a facturar + 1 mm.

En cuanto a la forma física de un tipo de dispositivo u otro existen diferencias en cuanto a la forma de la antena, siendo comunes el resto de componentes [34]:



Figura 52. Diferentes formas de antena (parabólica, tubo tranquilizador, con sello de proceso y varilla)

Como reglas generales de montaje, comentar brevemente las siguientes [35]:

- No instalar el dispositivo cerca de la entrada de producto.
- Evitar elementos de reflexión en el camino del haz de microondas que puedan provocar señales interferentes.
- La antena debe entrar en el tanque al menos unos 10 mm.
- Considerar la posibilidad de instalar cámaras laterales o tubos tranquilizadores.

Como cierre del apartado, se muestran las partes constructivas de un medidor por radar que podría ser adecuado para la aplicación:

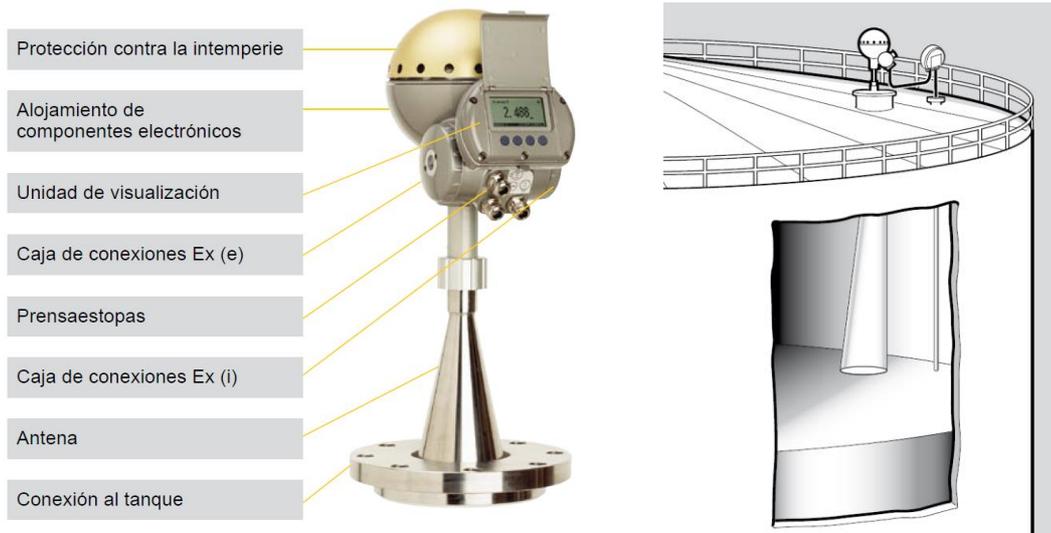


Figura 53. Aspectos constructivos de medidor por radar e instalación. Fuente: Rosemount.

4 VÁLVULAS DE CONTROL

La ISA define a la válvula de control como: “un dispositivo operado automáticamente el cual modifica el caudal en un sistema de control de procesos. Está compuesto por una válvula conectada a un mecanismo actuador el cual es capaz de variar la posición del elemento de control de caudal en la válvula en respuesta a una señal del sistema de control”.

Es, por tanto, el elemento final del lazo de control que actúa sobre la variable a controlar formando parte intrínsecamente de dicho lazo. La variable que manipula la válvula es un caudal, el cual varía para absorber una determinada pérdida de carga de la total disponible en el sistema. El valor de esta pérdida de carga está íntimamente ligado al de la válvula, función a la vez que se recibe del controlador.

Anticipando un poco los detalles que se ahondan en el capítulo final, el objetivo de un buen diseño de una válvula de control, trataría de lograr los siguientes ítems:

- Ganancia constante en todo el rango
- Respuesta lo más lineal posible (% caudal - % señal)
- Constante de tiempo diferente a la del proceso

A lo largo del capítulo se detallarán los detalles de las válvulas de control empleadas en el proyecto, así como el proceso de cálculo para el dimensionado de las mismas a través del cálculo del C_v y el criterio de selección de la característica de la válvula (relación entre porcentaje de carrera y caudal de paso).

4.1 Partes constructivas

Fundamentalmente, las partes que componen una válvula de control son las siguientes [36] [37]:

- **Cuerpo tapa:** elemento principal sometido a presión que proporciona las conexiones a proceso, el paso de caudal y soporta el *trim* de la válvula.
- **Trim:** componentes internos de la válvula que regulan el caudal del fluido a controlar.
- **Actuador:** un dispositivo actuado eléctrica, neumática o hidráulicamente que suministra fuerza y movimiento para colocar el elemento de cierre de la válvula en o entre la posición abierta o cerrada de la válvula. Pueden ser de simple efecto o de doble efecto.
- **Accesorios:** dispositivos normalmente unidos al actuador para diversas funciones de control tales como posicionadores, relés, válvulas de solenoide, reguladores del suministro de aire y finales de carrera.



Figura 54. Válvula de control y vista explosionada. Fuente: B-Valve/Hora.

En la Figura 54 se aprecian algunos elementos que también son importantes mencionar y que es necesario especificar:

- Bonete: porción de la válvula que contiene la empaquetadura y el sello del vástago y que puede guiar el vástago. Proporciona el acceso al cuerpo de la válvula para introducir los internos o puede ser parte del cuerpo propiamente. También proporciona la fijación del actuador al resto de la válvula. Los bonetes más comunes son roscados, atornillados, soldados, a presión o integrales.
- Empaquetadura: sistema de sellado consistente en un material deformable contenido en una caja el cual tiene normalmente medios para ajustar la presión de forma que se consiga un sellado efectivo.
- Vástago: el miembro mecánico que conecta el actuador con el elemento de cierre.

Las normas de referencia que definen cada componente son la ISA – S75.05 *Control Valve Terminology* complementada con ISA – S51.1 *Process Instrumentation Terminology* y la IEC – 534.1 *Control Valve Terminology and General Considerations*.

Desde el punto de vista de instrumentación los elementos más interesantes son los accesorios y el actuador, ya que son los elementos que distinguen a una válvula manual o autorregulada de una válvula de control. Estos elementos son los especificados por el instrumentista, mientras que cuerpo y *trim* son elementos que en ingeniería aparecen definidos por el equipo de mecánica y procesos, el cual especifica el tipo de material y tipo de válvula acorde a un tipo de servicio u otro.

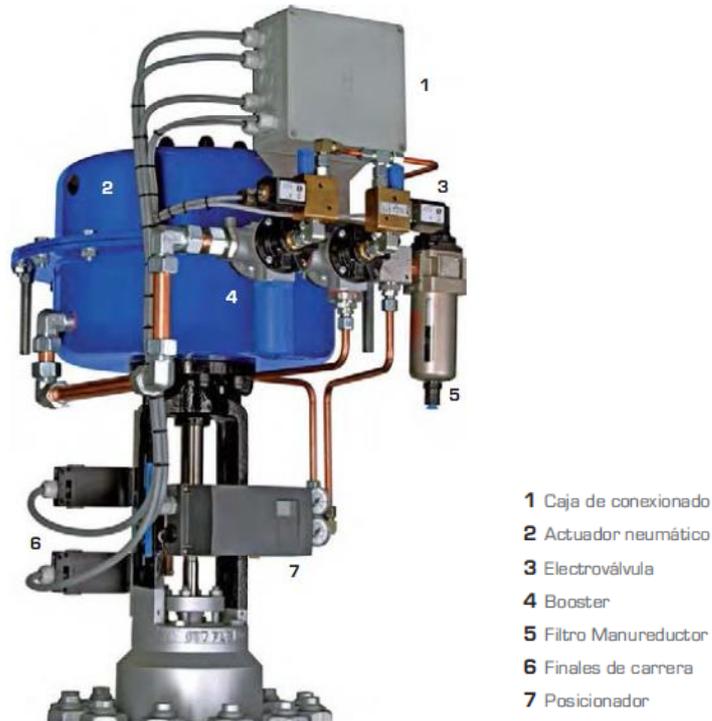


Figura 55. Accesorios de una válvula de control. Fuente: Hora.

En la Figura 55 se aprecia un detalle de algunos de los accesorios más comunes que poseen las válvulas de control, los cuales se comentan a continuación.

- Posicionador: su misión es recibir una orden que transmite al actuador para que marque la posición de la válvula. En todo momento controla que su orden es efectiva y que la válvula está al porcentaje de carrera que debe estar. La señal de pilotaje es la energía que necesita para que el actuador y el posicionador funcionen. En función del tipo de accionamiento los posicionadores se clasifican en electrónicos, neumáticos y electroneumáticos.
- Finales de carrera: proporcionan información de cuando la válvula ha llegado a su posición de apertura o cierre total. Pueden ser mecánicos (SPDT, un contacto conmutado NA/NC, DPDT, doble contacto conmutado) o inductivos a dos o tres hilos.
- Válvulas solenoide: permiten el comandamiento de los actuadores neumáticos, recibiendo una señal eléctrica y transformándola o no en paso de aire.
- Manorreductor: este dispositivo permite reducir la presión mediante estrangulación en el conducto de entrada al actuador.

4.2 Especificación de válvulas de control

En el presente trabajo se centrará la atención sobre dos de las válvulas enumeradas en el apartado 2.7, la 10-PV-002 y la 20-PV-001.

El primer criterio de selección será la experiencia del ingeniero de control que tendrá en cuenta: las características del lazo de control, la naturaleza del fluido, las condiciones de trabajo, el régimen de funcionamiento, las normas de seguridad y los requisitos especiales que sean de aplicación.

Una buena selección se traduce en los siguientes puntos:

- Calcular y definir el trim que se requiere; en función del tamaño, material, diseño, característica, estanqueidad, etc.
- Determinar en qué cuerpo de válvula se puede hallar el trim seleccionado; en función del tamaño del cuerpo, rating, material, etc.
- Determinar qué actuador permite la operación deseada de la válvula; en función del tipo de acción que se pretenda llevar a cabo, diferencial de presión, etc.
- Hacer un análisis final y ver si esa opción cumple los objetivos de diseño en cuanto a prestaciones, precio, mantenimiento o exigencias del cliente (entre otros).

El procedimiento suele llevarse a cabo de la siguiente forma:

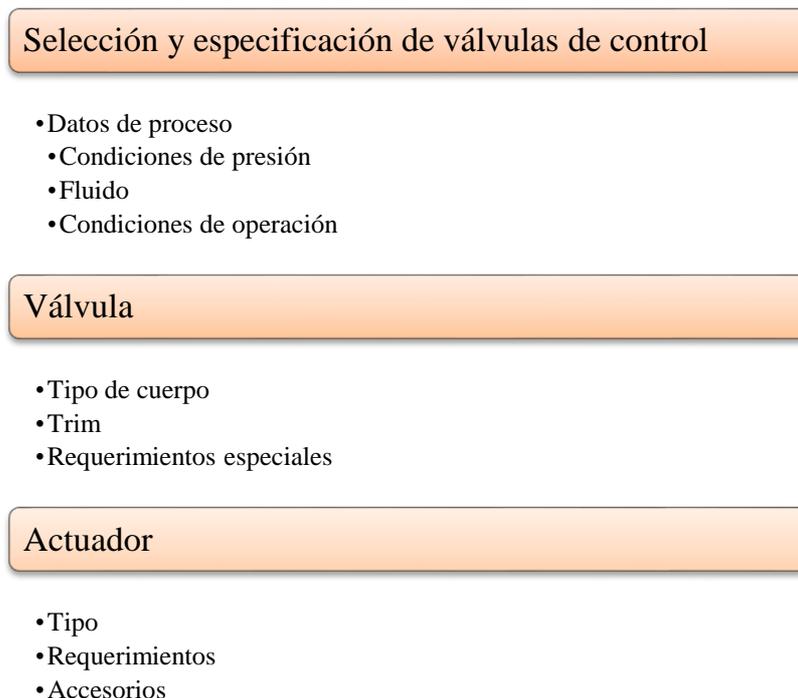


Figura 56. Partes de la especificación de la válvula

De cara a no solo especificar sino también justificar el empleo de materiales o características especiales en la válvula, se comenzará por la descripción del tipo de válvula empleado, el cuerpo y la tapa y el actuador. Posteriormente se presentarán los datos de las líneas y de proceso junto con la especificación elaborada.

4.2.1 Tipo de válvula

Los diseños de las válvulas de control vienen definidos fundamentalmente por el cuerpo-tapa, que actúa de recipiente a presión, soportando el contacto, la presión y la temperatura del fluido. Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador. Básicamente, se clasifican en dos grandes grupos: válvulas con obturador de movimiento lineal y válvulas con obturador de movimiento rotativo. Para la aplicación que nos ocupa, se emplearán válvulas de globo, que se sitúan dentro del primer grupo.

En las válvulas de movimiento lineal, el obturador se mueve en la dirección de su propio eje y se clasifican en válvulas de globo, válvula en ángulo, válvula de tres vías, válvula de jaula, válvula de compuerta, válvula en Y, válvula de cuerpo partido, válvula Saunders y válvula de compresión.

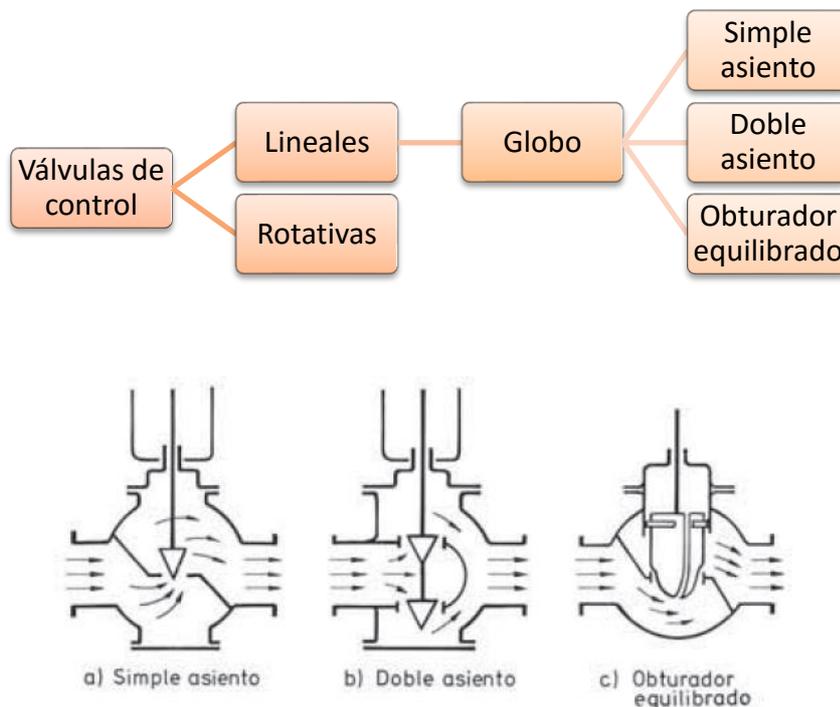


Figura 57. Clasificación de válvulas empleadas y esquema de obturadores.

En las válvulas de globo, como se aprecia en la figura, el flujo de entrada o salida es perpendicular al obturador. Las válvulas de simple asiento cierran en contra de la presión del proceso, por lo que requieren un actuador de mayor tamaño. Este tipo se emplea cuando la presión diferencial es baja y las fugas a través de la válvula con el obturador cerrado sean mínimas, como es el caso de la válvula de sales. El cierre se logra con asientos con arandela de teflón o grafito, para aplicaciones a alta temperatura (por encima de 220°C). Como se verá más adelante, este tipo es el adecuado para ambas aplicaciones, ya que hay un ΔP bajo e interesa que no se pierda aire comprimido o sales cuando la válvula esté cerrada.

4.2.2 Cuerpo y tapa

Una vez seleccionado el tipo, se procede a especificar el tipo de cuerpo, el cual debe resistir la temperatura y presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal que debe controlar y ser resistente a la erosión o corrosión producida por el fluido. Suele ser de hierro, acero y acero inoxidable. La tapa es el elemento que une el cuerpo con el actuador. Tanto cuerpo como conexiones a proceso están normalizadas acorde a temperaturas y presiones de trabajo acorde a normativa ASTM, DIN o ANSI entre otras.

Para las aplicaciones de este proyecto el cuerpo y la tapa tendrán el mismo material. Salvo causas especiales, el material del cuerpo y tapa debe de poder ser el mismo que el de la línea en la que va situada.

Para la línea de sales se empleará A216 WCC (ASTM), que es el acero al carbono utilizado para aplicaciones generales. Tiene una temperatura de trabajo con un límite superior de 425°C por lo que está dentro del rango en el que se mueven las sales frías.

Para la línea de balanceo se emplea A351 CF3M (ASTM) equivalente al más conocido de las denominaciones para acero inoxidable, AISI 316L SS, es adecuado para uso en servicios corrosivos o no corrosivos hasta una temperatura de 454°C.

Es muy importante determinar qué tipo de conexión a proceso se le aplicará a la válvula. Los tipos de conexiones a tubería (bridada o roscada) están definidas en función del rango de presión y temperatura normalizado (*rating*). Tanto para sales como para aire las conexiones serán soldadas. Dentro de este tipo de conexión se dan dos

tipologías, soldadura con encaje (*socket weld*) o soldadura a tope (*butt weld*). Las primeras se emplean para tamaños de válvula de hasta 2" y el segundo tipo desde 2 ½" hasta tamaños mayores [38]. La línea de aire es de 2" y la de sales de 10" por lo que se emplearán soldadura con encaje y soldadura a tope.

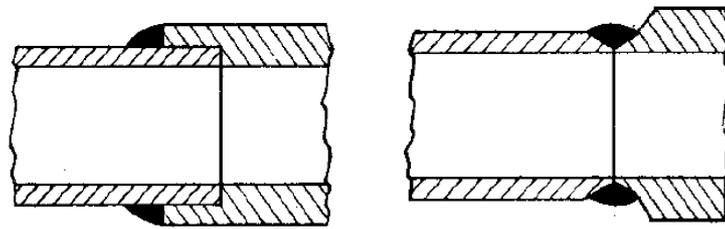


Figura 58. Tipos de conexiones soldadas.

4.2.3 Internos (trim)

Se considera interno todo aquello que está bañado por el fluido de proceso, a saber: vástago, empaquetadura, anillos de guía del vástago, obturador y asiento o asientos.

Uno de los criterios fundamentales en la elección de un tipo de obturador y asientos es la característica que tiene la válvula (isoporcentual, lineal o de apertura rápida), que se detallará más adelante. Otro de ellos es la existencia de corrosión o erosión por parte del fluido, criterio que aparecerá en sales. Por defecto, el obturador y los asientos son fabricados en acero inoxidable 316 porque este material es muy resistente a la corrosión y erosión del fluido.

Acorde a estos criterios, en la válvula 10-PV-002 el obturador se especificará en un acero inoxidable austenítico 321, el cual posee buenas propiedades de resistencia contra la corrosión. El vástago será de AISI 316.

En la 20-PV-001, el obturador será del mismo material del cuerpo, al no existir gran riesgo de corrosión y el vástago de AISI 316.

Para las empaquetaduras, serán de teflón y grafito para aire y sales respectivamente.

4.2.4 Característica de la válvula

Se define como la relación que existe entre el porcentaje de carrera del obturador y el caudal de paso por el fluido. La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina característica de caudal inherente y se representa, usualmente, considerando como abscisas la carrera del obturador de la válvula y, como ordenadas, el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante.

La elección de la característica tiene influencia en la estabilidad y controlabilidad del lazo de control debido a la influencia de la ganancia del cuerpo de la válvula en la ganancia global de los elementos del lazo, como se verá más adelante.

Los dos tipos de características más empleadas son la lineal y la isoporcentual, las cuales se describen brevemente a continuación.

4.2.4.1 Característica lineal

En esta característica un incremento de carrera provoca un igual incremento de caudal. La deducción de su expresión matemática es la siguiente [39]:

$$\frac{d(C_V/C_V \text{ máx})}{dx} = K$$

Donde:

x = tanto por uno de la carrera máxima de la válvula

K = constante

C_V = coeficiente de caudal de la válvula

Integrando quedaría:

$$\int d(C_V/C_V \text{ máx}) = \int K_1 dx$$

$$C_V/C_V \text{ máx} = K_1 + x K_2$$

Suponiendo $C_V = 0$ para $x = 0$ y $C_V = C_V \text{ máx}$ para $x = 1$ se obtienen unos valores de $K_1 = 1$ y $K_2 = 0$. Por lo que se obtiene la siguiente relación:

$$C_V = x C_V \text{ máx}$$

O lo que es lo mismo:

$$\text{Caudal} = x \text{ Caudal máximo}$$

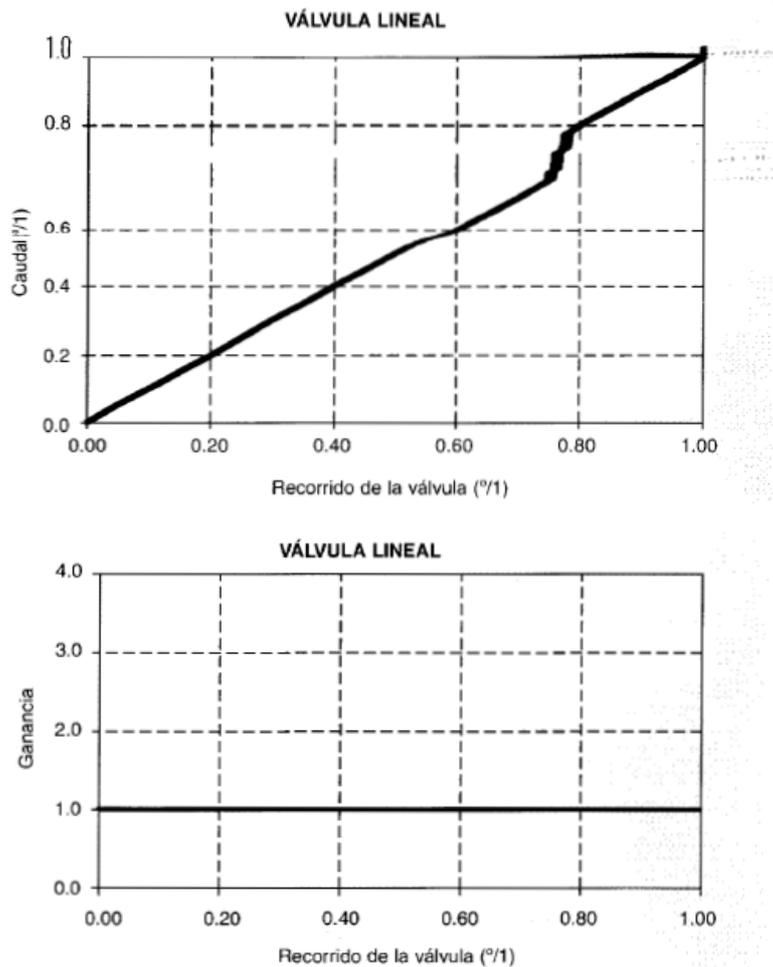


Figura 59. Característica de caudal lineal y ganancia.

Su forma es una recta de pendiente unitaria en cualquier tramo de su carrera. Para cualquier tramo de esta característica, la pendiente es constante y unitaria. Adelantando conceptos del siguiente capítulo, se puede definir en este punto la ganancia de la válvula, que se define como la relación entre la variación de caudal y la variación de carrera. Para el caso de este tipo de característica, la ganancia es constante y unitaria.

4.2.4.2 Característica isoporcentual

En esta característica, un incremento de carrera determina una variación de caudal que mantiene siempre el mismo porcentaje de caudal existente. Análogamente a la característica lineal el cálculo se deduce de la siguiente forma:

$$\frac{d(C_V/C_V \text{ máx})}{dx} = K_1 \frac{C_V}{C_V \text{ máx}}$$

Integrando:

$$\int \frac{d(C_V/C_V \text{ máx})}{(C_V/C_V \text{ máx})} = \int K_1 dx$$

$$\ln K_2 (C_V/C_V \text{ máx}) = K_1 x \rightarrow \frac{C_V}{C_V \text{ máx}} = \left(\frac{e}{K_2}\right)^{K_1 x}$$

Suponiendo $C_V = C_V \text{ mín}$ para $x = 0$ y $C_V = C_V \text{ máx}$ para $x = 1$ y denominando $R = \frac{C_V \text{ máx}}{C_V \text{ mín}}$:

$$\frac{C_V}{C_V \text{ máx}} = \frac{1}{R} R^x$$

Para una rangeabilidad tipo de 50 se tendría:

$$C_V = C_V \text{ máx } 0,02 \cdot 50^x$$

$$\text{Caudal} = \text{Caudal máx } 0,02 \cdot 50^x$$

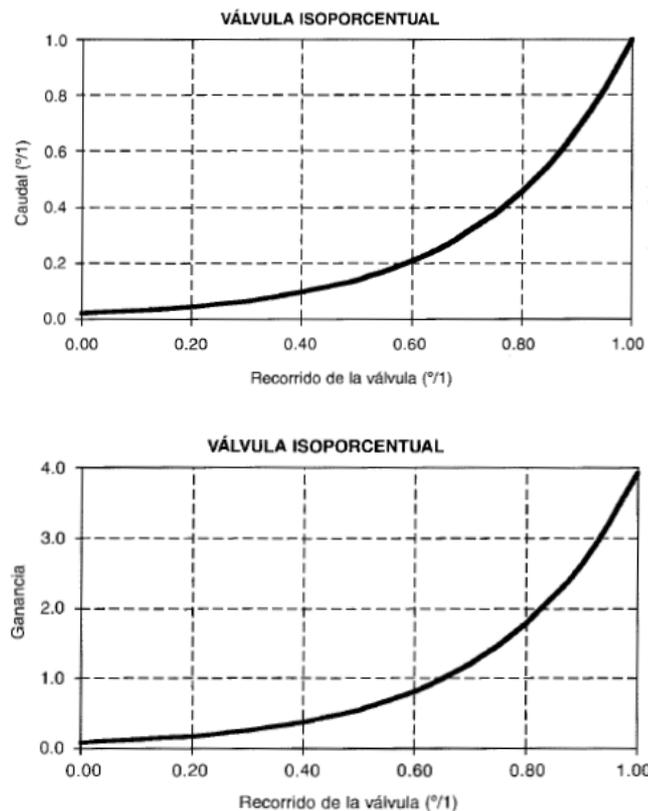


Figura 60. Característica y ganancia isoporcentual.

La característica de caudal inherente tipo igual porcentaje de uso más común es 50:1, o sea representa una característica cuyo alcance va desde 100 % de caudal (en 100 % de carrera) hasta 2 % del caudal (en 0 % de carrera), esto es 100:2 o, como más comúnmente se conoce, 50:1. En este caso, la ganancia de la válvula sería directamente proporcional al caudal [40].

Sobre la selección adecuada de un tipo de característica u otra la bibliografía consultada no establece un criterio definitivo. En algunos casos, se alude a que la selección del tipo de característica está contemplada dentro del alcance del fabricante de la propia válvula, quien proporciona una serie de directrices acerca del uso de un tipo u otro. De cara a utilizar un criterio concreto, para el presente trabajo se optará por seguir las directrices recogidas en bibliografía de referencia [38]. La selección de un tipo u otro se hace teniendo en cuenta las implicaciones en la ganancia total del lazo de control, la cual, para que el bucle sea estable debería ser menor que 1. Esta ganancia se halla realizando el producto de todas las ganancias de los elementos que intervienen en el lazo, como se profundizará más adelante. Para el caso bajo estudio, se deben considerar características isoporcentuales al realizarse control por presión.

4.2.5 Tipo de acción

Según su acción, las válvulas se dividen en válvulas de acción directa, cuando el obturador baja para cerrar y el de acción inversa cuando tiene que bajar para abrir. Análogamente, a los actuadores se les aplica la misma división, es decir, si la válvula abre cuando se le aplica aire al diafragma se dice que es de acción directa y por si cierra cuando se le aplica aire se dice que es de acción inversa.

De igual forma se le aplica de nuevo esta clasificación a las válvulas de control cuyo actuador es hidráulico, esto es, su actuador no está alimentado por aire sino por un pistón que actúa al ser energizado (son las denominadas electroválvulas).

Al seleccionar la válvula es imprescindible considerar el punto de vista de la seguridad. En todas las plantas se producen averías, incluidas fallos en alimentación de aire o de corriente eléctrica, por lo que es necesario al especificar la válvula determinar cuál es la posición extrema de la válvula (abierta o cerrada) a la cual esta tiende en el caso de que se produzca algún fallo que no permita su operación. Por la naturaleza de las aplicaciones bajo estudio, las dos válvulas especificadas serán de acción inversa, es decir, en caso de fallo, tienden a cerrar, por lo que el suministro de aire hará que abran. Comúnmente, se denominan “a fallo cierra”.

Este concepto va de la mano con otra de las características necesarias a especificar; la clase de fugas. Este parámetro determina, con la válvula en posición de cierre, el porcentaje de caudal permitido que puede perderse entre vástago y obturador. La norma ANS B16.104-1976 define una serie de clases predeterminadas [38]:

- Clase I: Fuga sin especificar
- Clase II: 0,5% del caudal a apertura total en válvulas de doble asiento y con asiento metal-metal.
- Clase III: 0,1% del caudal total en válvulas de doble asiento y con asiento metal-metal
- Clase IV: 0,01% del caudal a apertura total en válvulas simple asiento y con asiento metal-metal
- Clase V: 5×10^{-4} ml agua/min/pulgada de diámetro orificio/psi de presión diferencial para simple asiento y asiento metal-metal.
- Clase VI: fluido de prueba aire o N₂ con los siguientes caudales:

Diámetro nominal	Caudal de fuga (cm ³ /min)
1”	0,15
1 1/2”	0,30
2”	0,45

3"	0,90
4"	1,70
6"	4,00
8"	6,75

Tabla 12. Especificaciones para clase VI de fugas.

Como norma general, una clase IV para válvulas de control permite quedar por el lado de la seguridad.

4.2.6 Actuador y accesorios

Tras especificar todo lo que compone la válvula en sí, se especifican a continuación los accesorios necesarios para realizar las acciones de control para los lazos de control.

Como se ha dejado entrever antes, las válvulas serán neumáticas, es decir, se actuarán con aire. La presión de cierre se calcula realizando un balance de fuerzas en el actuador teniendo en cuenta los muelles que lo actúan. Ambos actuadores cierran ante un fallo. El actuador, tal y como se aprecia en la Figura 54, se situará preferentemente vertical, aunque por motivos de espacio, puede situarse lateralmente si a la hora de la instalación se requiere.

Las dos válvulas irán con filtro regulador y manorreductor con conexión roscada (NPT) para el control del aire de entrada cuya presión se tratará de mantener en unos 5 bares. El tubing de las conexiones en sales debería ser de AISI 316 debido a su buena resistencia a la corrosión. También se incluirá un posicionador con señal 4-20 mA con protocolo HART y alimentado a 24 VDC por lazo.

4.2.7 Cálculo de C_v

El parámetro C_v es un patrón universal de medida de caudal de fluido que circula por una válvula. Este coeficiente, introducido por la empresa Masonellan (1944) se define como "el número de galones USA de agua que atraviesan, en un minuto, un estrangulamiento en el que se produce una pérdida de carga de 1 psi" (1 galón USA = 3,785 L y 1 psi = 0,07 kg/cm²). Como se verá en el siguiente capítulo, este parámetro es fundamental en el cálculo de la ganancia correspondiente a la válvula [41]. Si se prefiere la definición en unidades métricas se puede definir el coeficiente como el caudal en m³/h de agua a 20°C que pasa a través de una válvula con una apertura determinada con una pérdida de carga de 1 bar. Las equivalencias entre ambas definiciones son las siguientes:

$$K_v = 0,853 \cdot C_v \text{ (m}^3\text{/h)}$$

$$C_v = 1,16 \cdot K_v \text{ (gal USA/min)}$$

En el anexo II: Dimensionado de válvulas de control se desarrolla la metodología para el cálculo del C_v de las válvulas del proyecto acorde al método definido por la ISA.

En resumen, los pasos que se llevan a cabo para el cálculo son los siguientes [42]:

- Con la presión / temperatura de diseño se define el rating, para un material dado.
- Partiendo con las presiones y P_v del fluido se define si el derrame es crítico ó subcrítico.
- Se aplica la formula que corresponda para un primer cálculo del C_v .
- Con este dato se hace una primera selección de la válvula y trim.
- Teniendo en cuenta la relación tamaño de válvula / tubería se hace la corrección por la influencia de los conos reductores.
- Esto dará lugar a un nuevo C_v instalado. Definir entonces el % de carrera para cada régimen de caudal: mínimo, normal, máximo.

- Verificar el valor de F_L en esas carreras, si el derrame es crítico, y recalcular el C_v si procede.
- Verificar que no haya cavitación ni ruido. Comprobar velocidad en la válvula tanto en líquidos y sobre todo en gases y vapores, por su influencia en el ruido; diámetro sónico. Ver N° de Mach.
- Finalmente se hará un repaso general que confirme la buena selección adecuada a las necesidades del lazo de control y proceso que queremos controlar.

Todos estos pasos y alguno más están integrados en los programas de cálculo de los fabricantes a partir de ISA/IEC. El cálculo realizado acorde a la norma ISA 75.01.01-2007 se validará con un programa específico de cálculo.

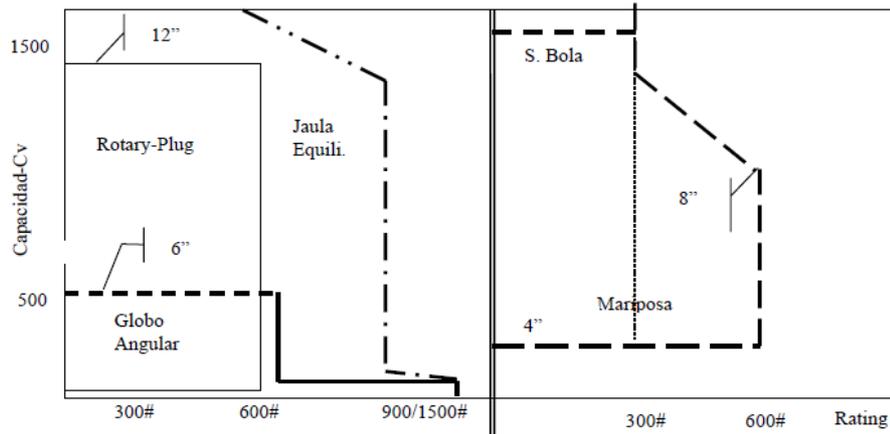


Figura 61. Relación rating/ C_v . Fuente: Master I&C ISA.

Esta figura da una idea de los tipos de válvulas a emplear en función del C_v y el rating. El rating es un concepto que se aplica en el contexto de las uniones bridadas en tuberías y es una forma de clasificar en base a presión y temperatura una serie de “clases de presión” para diferentes materiales. Estas clases de presión están prefijadas acorde a normativa, como por ejemplo ASME, sin embargo, en una planta de potencia en concreto o dentro de una compañía se puede desarrollar un criterio propio [43].

Para la selección del tamaño se tendrá en cuenta también la zona de trabajo en que debe operar la válvula, en toda su gama de caudales. Se ha de concretar un criterio para “centrar” la válvula, es decir, diseñar de manera que en función del régimen de caudal el porcentaje de apertura de la válvula sea el adecuado.

Si la válvula es lineal el rango de operación puede estar entre 10% a 90%, localizándose el C_v máx. entre 50% - 90%. Si fuera isoporcentual, el rango sería 20% - 90% situando el C_v máx. entre 75% - 90%. Otros autores difieren de esta opinión. En función de cuales sean las condiciones predominantes de trabajo, si se conocen con cierta seguridad, los criterios pueden variar [44].

Consolidando varias informaciones una recomendación más conservadora y práctica podría ser:

- Válvulas lineales: >10% - 80% carrera.
- Válvulas isoporcentuales: >10% - 85% carrera.

Se presentan a continuación los datos de proceso y el resultado de la especificación de las válvulas acorde a los apartados anteriores.

4.2.8 Línea de balanceo

Tag	20-PV-001		
Fluido/Estado	Aire comprimido	Gas	
Diámetro /Rating/Sch.	2"	CL 150	10S
Material/Especificación	A312		

Datos	Mínimo	Normal	Máximo	Unidades
Caudal	300	450	500	kg/h
Presión Entrada	10,84	10,84	10,84	bar a
Caída de Presión (ΔP)	9,99	9,99	9,99	bar
Temperatura	25	25	25	° C
Densidad	0,98	0,98	0,98	kg/ m ³
Viscosidad	0,02	0,02	0,02	cP
Cv	1,627	2,441	3,255	N/A
% Carrera	31,52	40,29	46,28	%
Sonido	79	84	87	dB

Tipo	Globo
Tamaño cuerpo	2"
Rating	CL 150
Presión Diseño [bar a]	12,84
Temperatura Diseño [°C]	57
Material del cuerpo/tapa	A351 CF3M
Tipo conexión a proceso	Soldadura con encaje
Material de empaquetadura	Teflón

Tipo de Interno (Trim)	Isoporcentual monoetapa	
Tipo Obturador	Equilibrado PTFE	
Cv de la válvula	26	
Característica	Isoporcentual	
Clase de fugas	IV	
Materiales	Obturador / Asiento	316 St. HF Seat & Guide
	Jaula / Vástago	316 St.

Tipo de actuador	Diafragma	
Presión de cierre [bar a]	10	
Acción de control	Regulación	
Acción del muelle	Cierre	
Posición a fallo de aire / fallo de señal	Cierre	
Orientación del actuador	Vertical	
Ajuste de aire (accesorio neumático)	Manorreductor	
Posicionador	Alimentación / Señal entrada	24 VDC 4-20 mA HART
	Transmisor de posición	N/A

4.2.9 Línea de sales

Fluido/Estado	Sales fundidas	Líquido	
Diámetro /Rating/Sch.	10"	CL 300	40
Material/Especificación	A106 Gr. B		

Datos	Mínimo	Normal	Máximo	Unidades
Caudal	150000	200000	1500000	kg/h
Presión Entrada	8	7	6	bar a
Caida de Presión (ΔP)	6	5	2	bar
Temperatura	290	290	290	° C
Densidad	1900	1900	1900	kg/ m ³
Viscosidad	3,5	3,5	3,5	cP
Cv	79,64	100	911,8	N/A
% Carrera	20,64	25,67	71,89	%
Sonido	72	74	72	dB

Tipo	Globo
Tamaño cuerpo	8"
Rating	CL 300
Presión Diseño [bar a]	26
Temperatura Diseño [°C]	370
Material del cuerpo/tapa	A216 WCC
Tipo conexión a proceso	Soldadura a tope
Material de empaquetadura	Grafito

Tipo de Interno (Trim)	Isoporcentual contorneado	
Tipo Obturador	Isoporcentual contorneado	
Cv de la válvula	1500	
Carácterística inherente de la válvula	Isoporcentual	
Clase de fugas	IV	
Materiales	Obturador / Asiento	316
	Jaula / Vástago	321

Tipo de actuador	Diafragma	
Presión de cierre [bar a]	10	
Acción de control	Regulación	
Acción del muelle	Cierre	
Posición a fallo de aire / fallo de señal	Cierre	
Orientación del actuador	Vertical	
Ajuste de aire (accesorio neumático)	Manorreductor	
Posicionador	Alimentación / Señal entrada	24 VDC 4-20 mA HART
	Transmisor de posición	N/A

Muchas empresas de válvulas ofrecen servicios específicos para sales y HTF tanto en diseño como en mantenimiento e investigación. Un ejemplo de válvula específica para sales como la especificada puede ser esta:

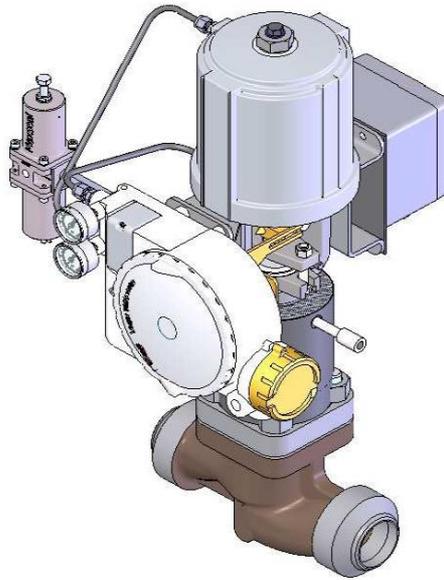


Figura 62. Válvula específica para aplicaciones en sales. Fuente: Flowserve.

4.3 Fenómenos físicos

Como cierre del capítulo de válvulas, en este apartado, se describen tres fenómenos que son necesarios tener en cuenta para el correcto dimensionado de la válvula. Estos tres fenómenos son: cavitación, *flashing* (régimen bifásico) y ruido.

Como se vio durante el dimensionado de la placa orificio, el paso de un fluido a través de una restricción provoca un incremento de la velocidad. La energía necesaria para este incremento de la velocidad se toma de la presión. Aguas abajo de la restricción, la velocidad se reduce y se recupera la presión de forma parcial produciendo pérdidas irreversibles en forma de energía interna de rozamiento. El punto de máxima velocidad y mínima presión (P_{VC}) se denomina “vena contracta”.

Este fenómeno se produce siempre que se dé régimen turbulento, ya que en régimen laminar apenas hay variación en la velocidad. La fracción de energía que se recupera depende de la forma geométrica de la válvula. La forma en que se produce esta recuperación dará lugar a diferentes fenómenos.

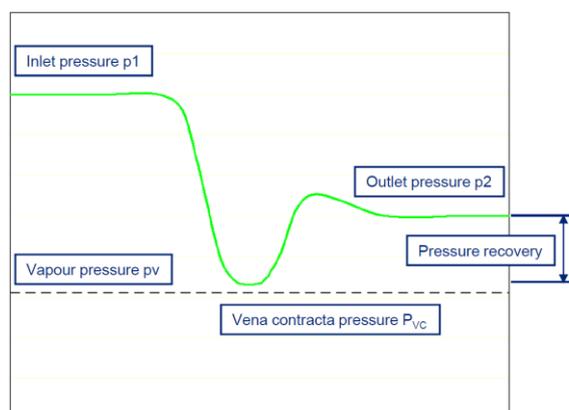


Figura 63. Derrame subcrítico (situación normal). Fuente: Seminario Hora.

4.3.1 Cavitación

El fenómeno de cavitación tiene dos fases. En la primera, se forman burbujas en el seno del líquido al descender la presión, debida a la vena contracta, por debajo de la presión de vapor del líquido. En la segunda fase, durante

el proceso de recuperación de la presión, algunas burbujas implosionan en zonas próximas en las superficies adyacentes (*trim*) y otras, deformadas por las turbulencias, se deforman dando lugar a microchorros denominados *microjets* que se proyectan contra el metal produciendo daños en el mismo (Figura 64).

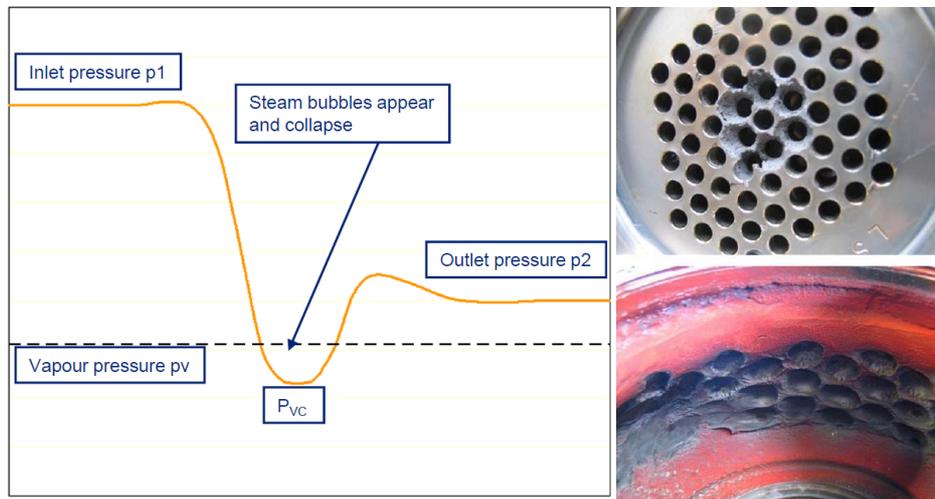


Figura 64. Cavitación. Fuente: Seminario Hora.

Frente a este fenómeno indeseable, existen dos tipos de estrategias posibles: controlar/resistir el fenómeno o evitarlo por completo:

- Evitar la cavitación

Es lo más deseable en la mayoría de los casos, para lo cual lo más adecuado es diseñar una válvula con unos internos de muy baja recuperación a fin de evitar que la vena contracta baje por debajo de la P_v , controlando la velocidad en el *trim*. Esto se logra mediante diseños multietapa o multijaula (el criterio varía según el fabricante). Predominan dos criterios de diseño:

Derrame axial: el fluido recorre todo el *trim* reduciendo proporcionalmente la velocidad. Estos diseños proporcionan un mejor comportamiento frente a la presencia de partículas a veces inevitables.

Derrame radial: mediante multijaulas o multistacks de diferente configuración.

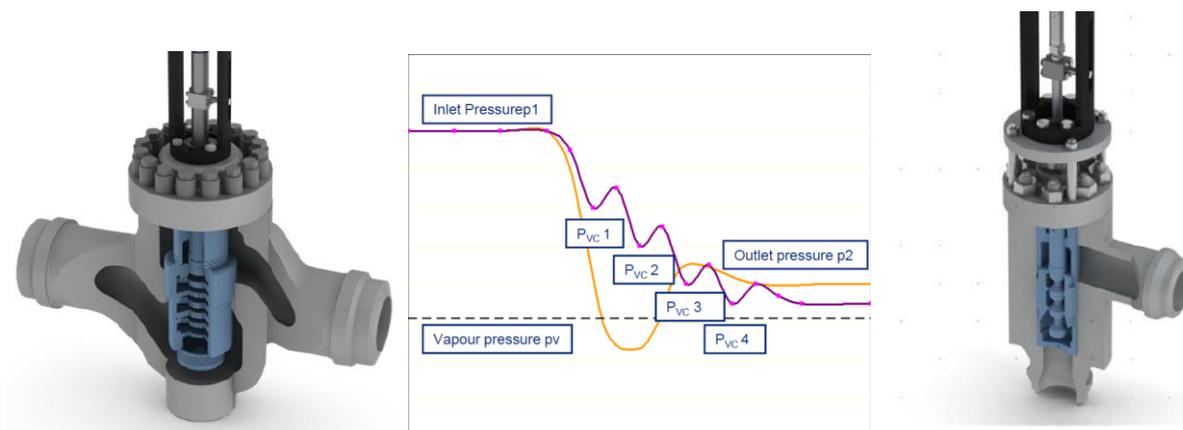


Figura 65. Efecto de un diseño multi-etapa o cascada. Fuente: Hora.

Como se aprecia en la Figura 65 un trim en cascada o multi-etapa permiten un descenso de la presión escalonado a lo largo del trim, por lo que no se llega a tener presión por debajo de P_v .

- Controlar/resistir el fenómeno

- Endurecer el trim mediante aportaciones de stellite o utilización de aceros duros (martensíticos).
- Repartir el incremento de presión entre la válvula y una restricción aguas abajo o poner dos válvulas en serie. Esto es válido cuando no hay grandes variaciones de caudal. Se suele realizar el reparto del 10-20% de caída de presión a la válvula y el resto al restrictor, normalmente multiorificio.
- Utilización de obturadores o jaulas multiorificio
- Utilizar diseños donde la implosión de las burbujas y microjets tengan lugar en una zona que no dañe a los internos

Todas estas acciones pueden ser válidas hasta moderadas presiones diferenciales, pero no es la Δp el único parámetro definitorio. Comúnmente, se acepta que la cavitación no produce daños si la P_1 está por debajo de 3,5 bares.

En sales fundidas la cavitación es el fenómeno que más problemas ocasiona a la hora de operar la planta. Como se ha mostrado anteriormente, las sales poseen una presión de vapor muy baja, por lo que que la presión descienda por debajo de este valor en la vena contracta sería difícil. No obstante, en plantas en operación, las válvulas de sales fundidas presentan inexplicablemente, fenómenos de cavitación que destruyen por dentro trims enteros, como se muestra en la Figura 66.



Figura 66. Interno dañado por operación en sales. Fuente: Flowserve.

4.3.2 *Flashing*

Este fenómeno se produce cuando después de la estrangulación, la presión de salida queda por debajo de la presión del líquido a la temperatura de entrada, es decir, se produce la misma situación que en cavitación, pero la recuperación no es tan grande. La vaporización tiene lugar después de la vena contracta, en la zona de expansión a la salida de la válvula. Por tanto, la agresividad de este derrame afecta al semi cuerpo de salida y no tanto a los órganos internos.

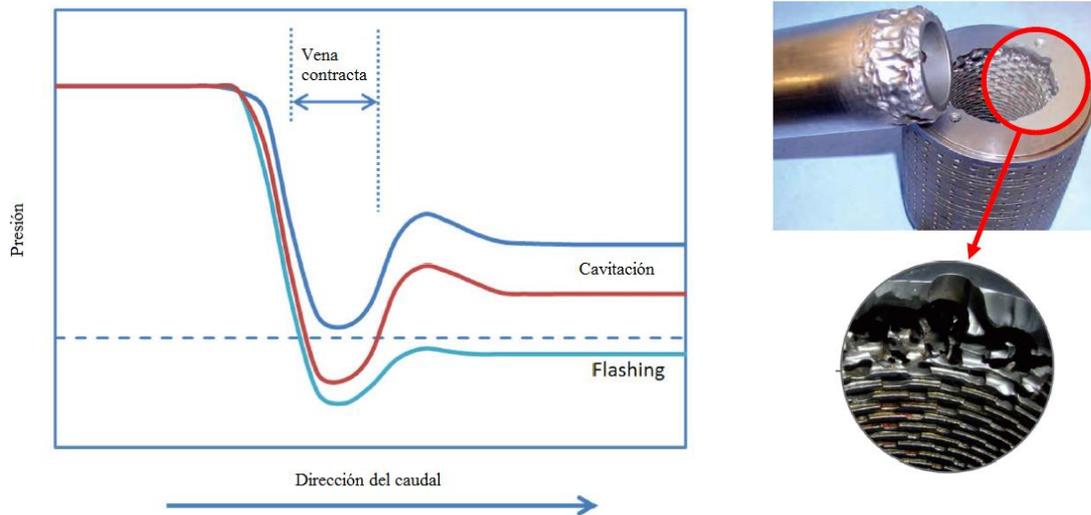


Figura 67. Flashing y efectos adversos sobre los internos. Fuente: Seminario HORA.

El fluido se encuentra en estado líquido a la entrada de la válvula y en estado vapor a la salida. Desde el punto de vista del cálculo es difícil precisar si hay que tratar como vapor o como líquido. La vaporización de fluidos que no sean agua es difícil de cuantificar, por lo que cuando no hay más remedio que dimensionar una válvula con régimen bifásico se halla un C_v para vapor y otro para líquido sumándose ambos para obtener el C_v final.

Este método presupone que el vapor se forma a la entrada de la válvula y no a la salida, lo cual no es cierto, además de que el vapor y el líquido lleven la misma velocidad.

El fenómeno da lugar al paso a gran velocidad a través de la válvula de una mezcla líquido-vapor, lo cual provoca que las gotas erosionen los internos tal y como se aprecia en la Figura 67. Los efectos no son tan devastadores como en cavitación, pero siguen siendo muy poco deseables. La misma paradoja que se daba para sales bajo efecto de cavitación se da para *flashing*.

4.3.3 Ruido

El ruido es la consecuencia más inmediata de un derrame crítico. Normalmente, el ruido ha de situarse por debajo de unos valores normalizados que suelen situarse en 85 dB (A). La intensidad del sonido, depende en primera instancia de la velocidad máxima en la estrangulación, sin embargo, en las válvulas de control, la interacción de las ondas de choque del chorro supersónico con las turbulencias modifica este resultado, produciéndose un crecimiento exponencial del sonido a partir de la velocidad del sonido.

Los factores que provocan el ruido son dos:

- Las ondas de choque que provoca un chorro supersónico originado en la vena contracta a un incremento de presión en la válvula elevado (por encima del crítico).
- La turbulencia del fluido, la cual provoca que el ruido sea efectivo tanto por encima como por debajo de las condiciones críticas del trim.

Los motivos por los se evita el ruido son principalmente dos: la presencia de ondas de choque en la vena contracta, las cuales pueden producir vibraciones que dañarían incluso a las tuberías cuando se superan los 115 dB (A) (fenómeno denominado fatiga acústica) y, por otro lado, frecuencias de vibraciones entre 2000 y 7000 Hz producen daños localizados en guías ó juego obturador-jaula.

Las medidas a nivel comercial ofertadas para evitar este fenómeno son tres (pueden ser combinadas entre sí):

1. Reducir la velocidad en el trim hasta regimenes subsónicos.
Varios diseños posibles son: multijaula, con agujeros que van en aumento hacia la salida o multietapa con obturador cónico (Figura 68). La reducción de la velocidad debe hacerse no sólo en el trim, si no también

en el cuerpo de salida y en la propia tubería. Esta velocidad de salida, cuando la válvula es Lo-dB (trim antiruido), debe ser inferior a 1/3 de Mach.

2. Reducir el nivel de ruido perceptible por el oído humano incrementando la frecuencia.
El oído humano percibe un determinado nivel de frecuencias, entre 500 y 6000 Hz. Se ha comprobado que el nivel de potencia acústica se reduce 3 dB cuando hacemos pasar el mismo caudal por dos orificios en lugar de uno. De esta forma se consiguen microjets con alta frecuencia de pico que no son audibles por el oído humano y al mismo tiempo son más fácilmente absorbibles por la tubería. Esta es una de las técnicas más usada en los diseños de válvulas Lo-dB.
3. Controlar-atenuar el flujo de salida en la tubería mediante: cartuchos/placas, silenciadores o asilamiento. Los difusores, cartuchos ó placas de atenuación son sistemas estáticos colocados después de la válvula, que, al mismo tiempo que distribuyen la pérdida de carga total atenúan el nivel sonoro en distintos porcentajes según sea el diseño. Pueden llegar a unos 20 dBA. Muchas veces se combina válvula con trim Lo-dB y cartucho atenuación de salida. Son aceptables estos sistemas cuando la relación de presiones P_1 / P_2 es superior a 10. En algunos casos se pueden usar cuando esta misma relación es sólo de 5. La instalación debe hacerse lo más cerca posible de la salida de la válvula. Algunos diseños lo incorporan en la boca de salida, cuando las condiciones de trabajo, por cálculo, lo permiten. En general se deben iniciar los cálculos reservando a la válvula un 20-30% de la pérdida de carga total del sistema, según sea Lo-dB ó no. Hay programas de cálculo que ayudan en este proceso haciendo finalmente la suma logarítmica de las dos fuentes de ruido y restando al mismo tiempo el efecto pantalla de atenuación que se le asigna a estos dispositivos.
Los silenciadores son equipos que instalados en línea de salida absorben el ruido transmitido por la tubería. Particularmente usados en descargas de gas ó vapor a la atmósfera.
4. El aislamiento térmico ó acústico de un tramo de tubería, incluso de la propia válvula.
En este apartado puede incluirse el sobredimensionamiento del espesor de la tubería de salida. Se pueden conseguir mayores atenuaciones con aislamientos combinados que incluyen capas de lana de vidrio 50 Kg/m³ con lana mineral 80 Kg/m³ separada por láminas de plomo de 5-6 Kg/m².

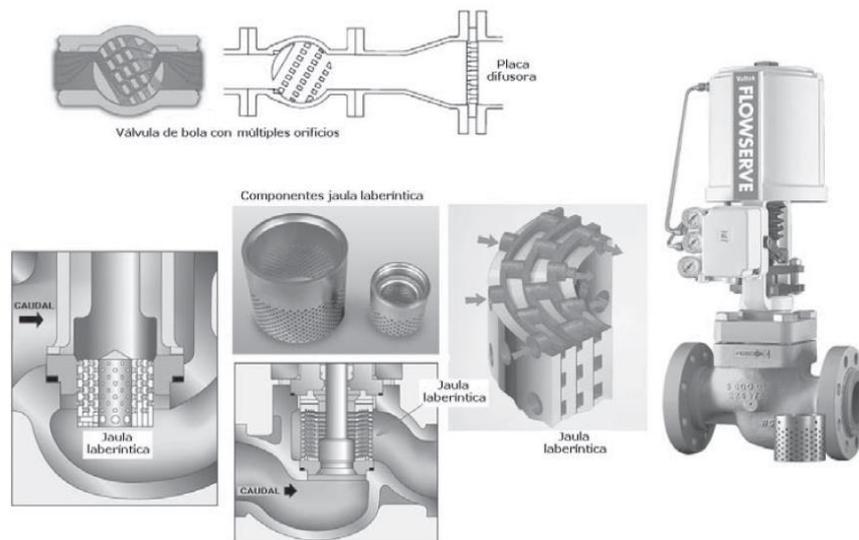


Figura 68. Conductos laberínticos entre obturador y asiento y difusores.

5 LAZO DE CONTROL

EL objetivo de este capítulo consiste en modelar cada uno de los elementos que componen uno de los lazos de control descritos de cara a, una vez diseñado el controlador adecuado, realizar una simulación. Si está correctamente diseñado, el lazo de control será capaz de absorber una perturbación para poder mantener en el punto de consigna deseado la variable de interés, que en este caso es la presión en el tanque de sales frías.

Como se adelantaba al inicio, el lazo de control se compone de los siguientes elementos: proceso, transmisor, controlador y elemento final de control. Cada uno de estos elementos lleva asociada una función de transferencia que será necesario modelar.

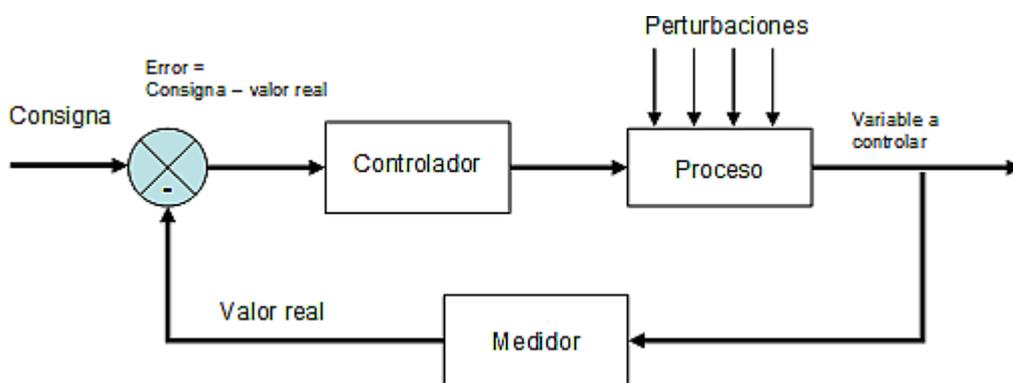


Figura 69. Esquema típico de lazo de control.

El bloque “sistema” lleva implícito el elemento final de control, es decir, las funciones de transferencia de válvula y sistema van dispuestas en serie. Cada uno de los bloques representados lleva asociadas dos partes: una dinámica y una ganancia. La dinámica (que en cada caso será de primer orden) se traduce en una constante de tiempo y la ganancia en un valor constante. En algunos casos, estos dos parámetros serán conocidos o seguirán una determinada fórmula conocida. En el caso de válvula y sistema, será necesario plantear un modelo partiendo de unas hipótesis para obtenerlos.

El desarrollo del capítulo se hará de la siguiente forma: en primer lugar, se deducirán las funciones de transferencia asociadas a proceso y válvula respectivamente, para las cuales serán necesarias hipótesis de partida y simplificaciones. Posteriormente se planteará el bloque asociado al transmisor, el cual seguirá una forma conocida de antemano. Con todos estos elementos modelados se procederá al diseño y ajuste del controlador más adecuado para la aplicación bajo estudio. Finalmente, se expondrán las simulaciones y las conclusiones que se obtienen de las mismas.

5.1 Modelado del proceso

El lazo de control a modelar es la entrada/salida de aire de un tanque de sales. El procedimiento para realizar el modelado comprende los siguientes pasos:

- Planteamiento del modelo mediante ecuaciones diferenciales el cual se realizará en base a una serie de hipótesis simplificativas. Este modelo relacionará la variable deseada a controlar, presión, con otra variable de entrada, en este caso el caudal que regula la válvula de control
- Linealización del modelo en torno a un punto de funcionamiento (*set point*). En este mismo apartado se explica la metodología seguida para la linealización del modelo.
- Transformación mediante Laplace de las ecuaciones obtenidas que relacionan entradas y salidas para

obtener los bloques a implementar en la simulación.

Como se comentó en el capítulo 2, el objetivo de mantener presurizado el tanque de sales frías es el de mantener la presión del mismo por encima de un determinado valor, manteniendo una presión positiva y evitar la entrada de aire húmedo. Para llevar a cabo esta tarea, el lazo emplea la válvula de control de aire comprimido 20-PV-001, la cual estrangula la línea de aire comprimido que entra al tanque desde el sistema de aire comprimido. Si la presión descendiera de 10 mbarg, la válvula abriría permitiendo la entrada de aire para compensar la pérdida de carga.

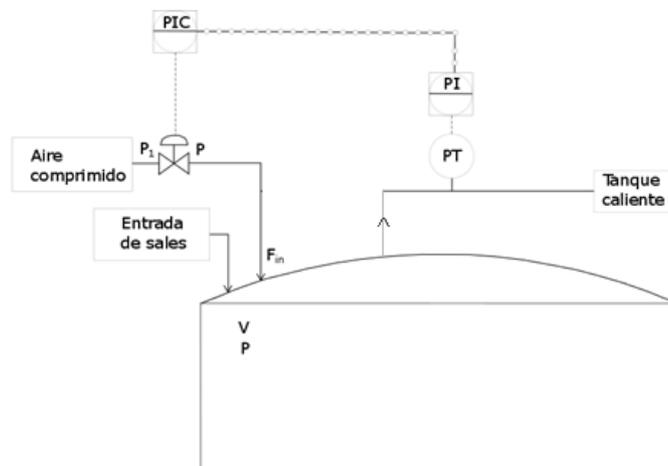


Figura 70. Esquema del lazo de control

El volumen de aire que contiene el tanque en todo momento es desconocido. Sin embargo, los niveles de llenado de sales del tanque para diferentes regímenes de funcionamiento son conocidos, por lo que conociendo las dimensiones del tanque es posible plantear un balance de masa de la cantidad de aire que hay en el interior del tanque de sales frías en un determinado intervalo de tiempo. Traducido en ecuaciones, se puede plantear el siguiente balance de masas:

$$\text{Velocidad de acumulación} = \text{Velocidad masa}_{\text{entrada}} - \text{Velocidad masa}_{\text{salida}};$$

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out};$$

$$\frac{dV\rho}{dt} = F_{in}(t)\rho_{in} - F_{out}(t)\rho_{out}$$

Donde:

- V : volumen de aire en el tanque
- $F_{in/out}$: caudales de entrada/salida de aire
- $\rho_{in/out}$: densidades a la entrada y salida.

Donde se han planteado las ecuaciones correspondientes a un balance de masas dinámico, basadas en velocidad de cambio instantánea. De estas ecuaciones se ha obtenido una relación entre el caudal de entrada por la línea de balanceo y el caudal de salida. Necesitamos por tanto relacionar volumen de aire en el tanque con caudal estrangulado a la salida. Para ello se introduce la hipótesis de que la relación de presión- volumen está regida por la ecuación de los gases ideales:

$$P v = R T$$

Donde:

- P : presión en el tanque
- v : volumen molar en el tanque
- R : constante de los gases ideales
- T : temperatura en escala absoluta

La cantidad de moles en el tanque es por tanto el cociente entre volumen de aire en el tanque y volumen molar. Se puede reescribir la cantidad total de gas en el tanque como:

$$\frac{V}{v} = \frac{P V}{R T}$$

Combinando esta relación con la ecuación de balance se obtiene la relación deseada:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{RT}{VM} [F_{in}(t) - F_{out}(t)]$$

Donde se ha supuesto que la densidad de entrada/salida y en el interior del tanque no se ve alterada. El siguiente paso es determinar cual es el valor de ese caudal estrangulado a la salida F_{out} . Nótese también que para poder utilizar volúmenes máscicos y no molares se ha añadido la masa molar.

El caudal de entrada tras la estrangulación de la válvula es conocido y está relacionado con el coeficiente de caudal calculado previamente por lo que se comprueba que un correcto dimensionado de la válvula influye en la estabilidad del lazo de control en el que se implementará el elemento final de control. Este caudal se rige por la siguiente expresión:

$$F_{in}(t) = K_V \sqrt{\frac{P_1 - P}{\rho_r}} [m^3/h]$$

Donde:

- K_V : coeficiente de caudal de la válvula (unidades métricas)
- P_1 : presión a la entrada de la válvula
- P : presión a la salida de la válvula y del interior del tanque.
- ρ_r : densidad relativa con respecto a la del aire a 0 °C y 1 atm.

Como interesa trabajar con caudales máscicos, se puede añadir la densidad en la expresión fuera de la raíz. Se observa que varios de los miembros de la expresión son constantes conocidas, pudiéndose simplificar de la siguiente forma:

$$F_{in}(t) = K_V \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_r}} = K_V \frac{\rho}{\sqrt{\rho_0}} \sqrt{P_1 - P} = C \sqrt{P_1 - P}$$

Condensando en la constante C los términos constantes conocidos. Incorporando esta ecuación a las deducidas anteriormente:

$$\frac{VM}{RT} \frac{dP(t)}{dt} = (C \sqrt{P_1 - P}) - F_{out}$$

Se ha logrado el primero de los objetivos marcados en la obtención del modelo que es relacionar las variables de interés. Es momento ahora de linealizar el modelo desarrollado. Para ello es necesario hallar los puntos de funcionamiento en torno a los que linealizar. Sin ánimo de entrar en detalles, se explica la metodología de linealización en torno a un punto de operación [45]. Si se considera un sistema cuya entrada es $x(t)$ y su salida es $y(t)$ la relación entre x e y se obtiene con una función que las relaciona:

$$y = f(x)$$

Si se conoce que para la condición de operación x e y toman los valores \bar{x} e \bar{y} respectivamente, si se desarrolla la función en series de Taylor en torno a ese punto de operación:

$$y = f(x) = f(\bar{x}) + \frac{df}{dx} (x - \bar{x}) + \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dx^2} (x - \bar{x})^2 + \dots$$

Donde las derivadas de primer orden y de orden superior se evalúan en \bar{x} . Si la variación con respecto al punto de operación es pequeña (detalle que puede considerarse ya que el control busca mantenerse todo el tiempo posible en ese punto) es posible no considerar los términos de orden superior. Se puede escribir la ecuación como:

$$y = \bar{y} + K(x - \bar{x})$$

Donde:

$$- K = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=\bar{x}}$$

Por lo que se puede ver que la relación entre entrada y salida es proporcional. Este modo de proceder se puede extrapolar a un sistema que tenga más de una entrada:

$$y = f(x_1, x_2)$$

De forma similar al desarrollo realizado, se puede llegar a una relación proporcional de la salida con cada una de las entradas:

$$y - \bar{y} = +K_1(x_1 - \bar{x}_1) + K_2(x_2 - \bar{x}_2)$$

Donde:

$$- K_1 = \left. \frac{df}{dx_1} \right|_{x_1=\bar{x}_1}$$

$$- K_2 = \left. \frac{df}{dx_2} \right|_{x_2=\bar{x}_2}$$

Es importante recordar que un modelo matemático determinado, que se use en el análisis y el diseño, puede representar con precisión la dinámica de un sistema real para ciertas condiciones de operación, pero puede no ser preciso para otras. En el caso bajo estudio, se acepta esta simplificación dado que el proceso está diseñado para funcionar lo más cerca posible de las condiciones de operación establecidas.

Aplicando la metodología al caso que nos ocupa:

$$\frac{\partial f}{\partial(dP)} = \frac{VM}{RT} \quad \frac{\partial f}{\partial P} = -\frac{C}{2\sqrt{P_1 - P}}$$

$$\frac{\partial f}{\partial F_{out}} = 1$$

La expresión del modelo linealizado queda expresada como:

$$\frac{VM}{RT} \frac{d\Delta P}{dt} - \frac{C}{2\sqrt{P_1 - P}} \Delta P = \Delta F_{out}$$

Donde:

P_0 : presión en el punto de consigna

ΔX : variables incrementales que representan la desviación de sus puntos de operación.

Operando para evitar las raíces cuadradas en los denominadores:

$$\left(\frac{2VM\sqrt{P_1 - P_0}}{C R T} \right) \frac{d\Delta P}{dt} - \Delta P = \left(\frac{2\sqrt{P_1 - P}}{C} \right) \Delta F_{out}$$

Identificando términos se obtiene la siguiente expresión:

$$\tau_P \frac{d\Delta P}{dt} - \Delta P = K_P \Delta F_{out}$$

Siendo:

- $\tau_P = \frac{2VM\sqrt{P_1 - P_0}}{C R T P_0}$
- $K_P = \frac{2\sqrt{P_1 - P}}{C}$

Aplicando transformada de Laplace se obtiene la expresión de la función de transferencia del proceso a implementar en el lazo:

$$\frac{P}{F} = \frac{K_P}{\tau_P s + 1}$$

5.2 Función de transferencia de la válvula

El modelado de la función de transferencia se hará considerando que la válvula sigue una dinámica de primer orden por lo que será necesario considerar una ganancia y una constante de tiempo. En el apartado de diseño de elementos finales de control se comentó la relación que existe entre el caudal de paso y e

l porcentaje de apertura para un tipo de característica de caudal u otro, lo cual no debe confundirse con el concepto que se trata en este momento.

La ganancia de la válvula de control viene expresada como la relación entre el incremento del caudal de salida y el incremento en la señal de entrada. Como en la práctica la variación en la señal de entrada es casi lineal con la carrera, puede admitirse que la ganancia equivale a dq_e/dx siendo q_e caudal efectivo y x la carrera. Señalar que este caudal efectivo no es el mismo que el caudal inherente utilizado en el apartado de las características de las válvulas.

Se pretende hallar la siguiente relación:

$$\frac{dq_e}{dx} = \frac{dq_e}{dq_i} \frac{dq_i}{dx}$$

Donde q_i es el caudal inherente. El segundo término de la relación deseada es el hallado con anterioridad cuando se definieron los tipos de características.

La relación entre caudal inherente y caudal efectivo la proporciona la rangeabilidad, R [38]:

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - R + \frac{R}{q_i^2}}}$$

Operando resulta:

$$\frac{dq_e}{dq_i} = -\frac{1}{2} \left(1 - R + \frac{R}{q_i^2}\right)^{-\frac{3}{2}} \left(-\frac{2Rq_i}{q_i^4}\right) = \frac{R}{q_i^3} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - R + \frac{R}{q_i^2}\right)^3}}$$

Para una válvula de característica isoporcentual con rangeabilidad $R=50$ se sabe que:

$$q_i = 0,02 \ 50^x$$

Por lo que dq_i/dx queda como:

$$\frac{dq_i}{dx} = 0,02 \ 50^x \ln(50) = q_i \ln(50)$$

Como es natural, si solo se considera la característica inherente, la ganancia de la válvula se ve enormemente simplificada:

$$\frac{dq_i}{dx} = q \ln(50)$$

Quedando una ganancia directamente proporcional al caudal de entrada. Hay, por lo tanto, dos opciones posibles: aproximar la ganancia de la válvula considerando que la característica de caudal efectiva es la característica de caudal inherente, en cuyo caso habría que considerar una constante de tiempo arbitraria y emplear la expresión deducida anteriormente o linealizar la expresión que relaciona incremento de caudal efectivo e incremento de la

señal de entrada.

Si se opta por esta segunda opción, el modo de proceder es el descrito a continuación [46].

Si se denota por y al incremento de caudal efectivo y por x al incremento de la señal de entrada se puede expresar la relación deducida anteriormente de la siguiente forma:

$$y = K 50^x$$

Donde se ha denotado con K a las constantes numéricas agrupadas en una misma variable. Tomando logaritmos, esta expresión puede expresarse como:

$$\log(y) = \log(K) + x \log(50)$$

A partir de este punto, se puede aproximar esta relación por una recta obteniendo la pendiente y la ordenada en el origen, para lo cual es necesario disponer previamente de dos puntos pertenecientes a la recta logarítmica que se va a linealizar: (x_1, y_1) (x_2, y_2) . Se procede al cálculo de la pendiente:

$$m = \log(50) = \frac{\log\left(\frac{y_2}{y_1}\right)}{x_2 - x_1}$$

A continuación, se halla la ordenada en el origen:

$$n = \log(K)$$

Quedando finalmente:

$$y = mx + n = x \log(50) + \log(K)$$

De cara a simplificar la simulación, la válvula constará de una ganancia determinada como se ha expuesto en este apartado y un valor de constante de tiempo típica.

5.3 Función de transferencia del transmisor

Un transmisor electrónico con señal 4-20 mA, como los especificados en el proyecto, consta de un detector, que en el caso de los transmisores de presión es capacitivo, una unidad magnética de realimentación y un amplificador. Representando los bloques que componen dichos elementos quedaría de la forma que muestra la figura [47]:

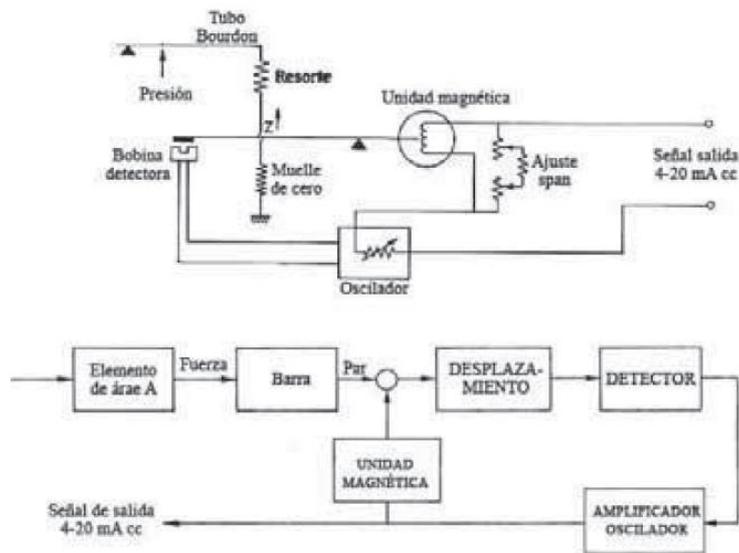


Figura 71. Elementos y bloques de un transmisor electrónico. Fuente: [47].

Si se identifican cada uno de estos elementos mediante álgebra de bloques se obtiene el siguiente esquema:

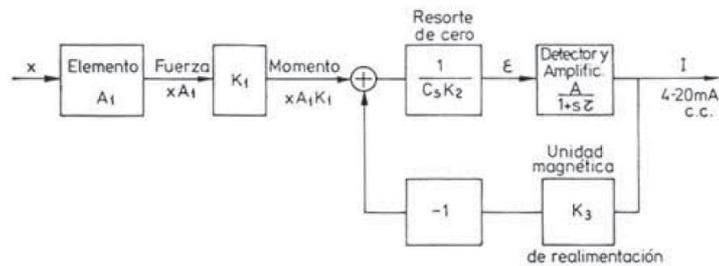


Figura 72. Bloques de transmisor electrónico. Fuente: [47].

Aplicando álgebra de bloques, se obtiene una función de transferencia que relaciona la variable de interés x y la salida de intensidad:

$$\frac{I}{x} = A_1 K_1 \frac{\frac{A}{C_s K_2 (1 + s\tau)}}{1 + \frac{A}{C_s K_2 (1 + s\tau)}} = \frac{A_1 K_1 A}{C_s K_2 (A K_3 + C_s K_2)} \frac{1}{1 + s\tau \frac{C_s K_2}{A K_3 + C_s K_2}}$$

La dinámica de los sistemas eléctricos es mucho más rápida que la de los sistemas mecánicos, por lo que $\frac{A}{(1+s\tau)}$ puede despreciarse con respecto a los otros términos, quedando la función de transferencia simplificada de la siguiente forma:

$$\frac{I}{x} = \frac{A_1 K_1}{K_3}$$

Es decir, el resultado es una ganancia constante debido a elementos mecánicos y a la unidad magnética de realimentación. Para el nivel de detalle manejado en el proyecto, el transmisor, al tener una dinámica mucho más rápida que el resto de elementos, se puede aproximar como una realimentación negativa para el lazo de control, es decir, se despreciará el efecto del transmisor.

5.4 Diseño y sintonización del controlador

Una vez integrados los bloques de planta, elemento final de control y transmisor, es el momento de diseñar el controlador adecuado que permita alcanzar los objetivos de control deseados.

Sin controlador, el lazo de control modelado adquiere la siguiente forma ante un escalón referencia:

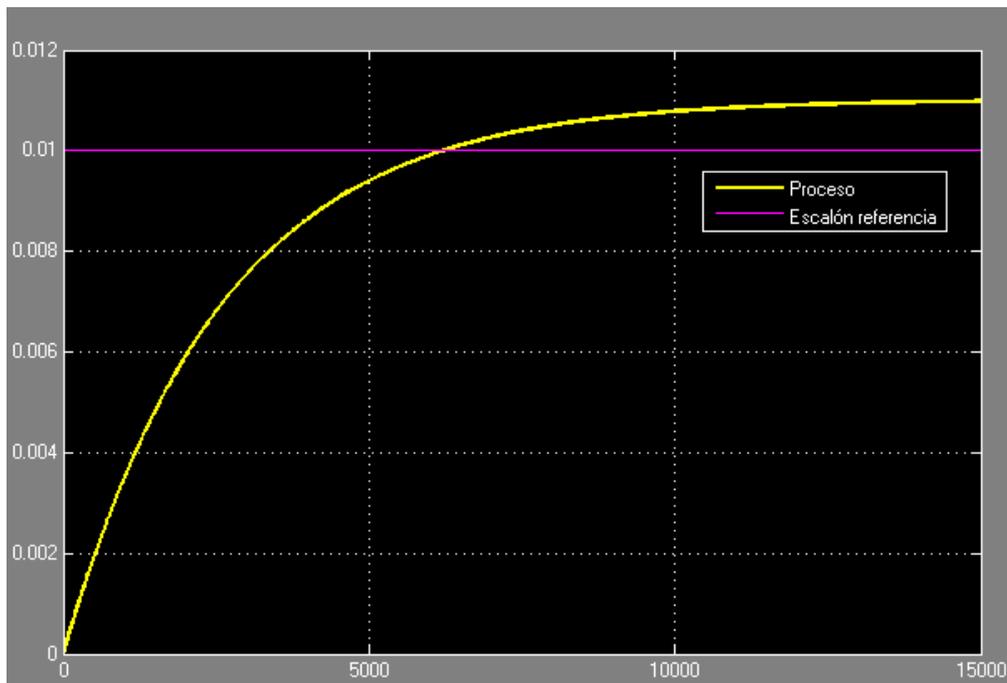
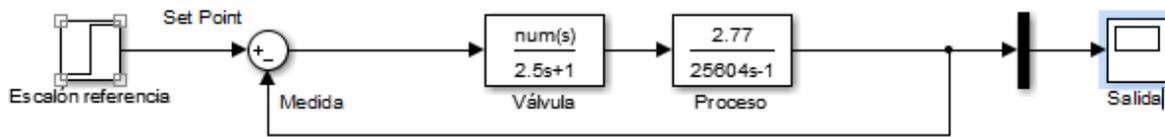


Figura 73. Esquema y simulación de lazo de control.

Como se aprecia, la respuesta del sistema no presenta sobreoscilación. Sin embargo, el tiempo de subida y el tiempo que se tarda en alcanzar el régimen permanente pueden ser mejorados con ayuda de la acción de control adecuada.

El modo de proceder en el diseño del controlador suele ser establecer una serie de criterios de control (tiempo de subida, error en régimen permanente, sobreoscilación, etc.) y en base a lo que se quiere obtener utilizar un tipo de controlador u otro. Cada elemento del controlador seleccionando provocará un tipo de acción u otro sobre los parámetros mencionados en la respuesta del lazo de control ante una variación del punto de operación. A continuación, se explicarán los efectos de las acciones de control integral y derivativa sobre el comportamiento de un sistema.

Los tipos de controladores industriales se clasifican acorde a sus acciones de control. Están los siguientes:

- Controladores *on-off*
- Controladores proporcionales (P)
- Controladores proporcionales integrales (PI)
- Controladores proporcionales derivativos (PD)

- Controladores proporcionales integrales derivativos (PID)

De forma general y para este trabajo en particular, se emplea el controlador PID, ya que condensa las propiedades de los controladores proporcional, proporcional-derivativo y proporcional-integral.

La ecuación de un controlador con esta acción determinada está dada por:

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_P T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde:

$e(t)$: señal de error (diferencia entre variable medida y consigna)

$u(t)$: señal de entrada

Su función de transferencia sería la siguiente:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

A continuación, se resumen brevemente los efectos de las acciones de control que este elemento introduce en la respuesta temporal del sistema.

- Acción de control integral

En el control de una planta, cuya función de transferencia no posee un integrador $1/s$, hay un error en estado estacionario, o desplazamiento (*offset*), en la respuesta para una entrada escalón. Dicho *offset* se elimina si se incluye la acción de control integral en el controlador.

La acción de control integral, aunque elimina el *offset* o el error en estado estacionario, puede conducir a una respuesta oscilatoria de amplitud decreciente lenta o, incluso, de amplitud creciente, y ambos casos, por lo general, se consideran indeseables [48].

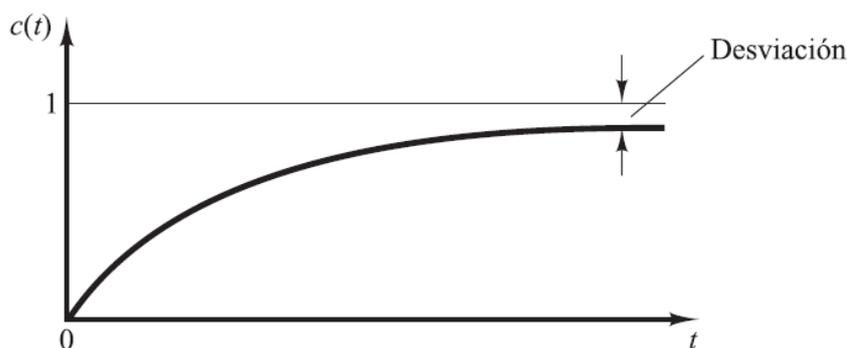


Figura 74. Error en régimen permanente en sistema de primer orden con controlador proporcional.

- Acción de control derivativa

La acción de control derivativa es un modo de aportar sensibilidad a un controlador proporcional. Una ventaja de usar una acción de control derivativa es que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Por tanto, el control derivativo prevé el error, inicia una acción correctiva oportuna y tiende a aumentar la estabilidad del sistema [48].

En resumen, la contribución de cada una de las acciones al controlador son las siguientes [49]:

- La acción proporcional estabiliza la oscilación natural de la variable controlada.

- La acción integral proporciona una corrección o reajuste para compensar las variaciones de carga y cambios en el punto de consigna (*set point*) de tal forma que se elimina el error en régimen permanente, manteniendo la variable controlada sobre el punto de consigna.
- La acción derivativa anticipa el efecto de la acción proporcional con el fin de estabilizar más rápidamente la variable controlada después de cualquier variación de carga.

	Velocidad	Estabilidad
Ganancia proporcional (K)	Mayor	Menor
Tiempo integral (Ti)	Menor	Mayor
Tiempo derivativo (Td)	Mayor	Menor

Tabla 13. Efectos sobre el lazo de control de las acciones de control.

Para sintonizar el controlador será necesario hallar los valores adecuados para T_i , que modela la acción integral, T_d , que modela la acción derivativa y para K_p que modela la acción proporcional.

Una vez que se selecciona el tipo de controlador, se pueden emplear diferentes métodos de ajuste del mismo, como pueden ser ajuste mediante lugar de las raíces o mediante análisis de la respuesta en frecuencia.

En este caso, se empleará la herramienta de sintonización que ofrece el programa empleado (Simulink), cuya interfaz se presenta. Es muy intuitiva y da la posibilidad de manipular las dos acciones del controlador para obtener la respuesta deseada, la cual se puede ver en el mismo instante en el que se manipulan los parámetros del controlador.

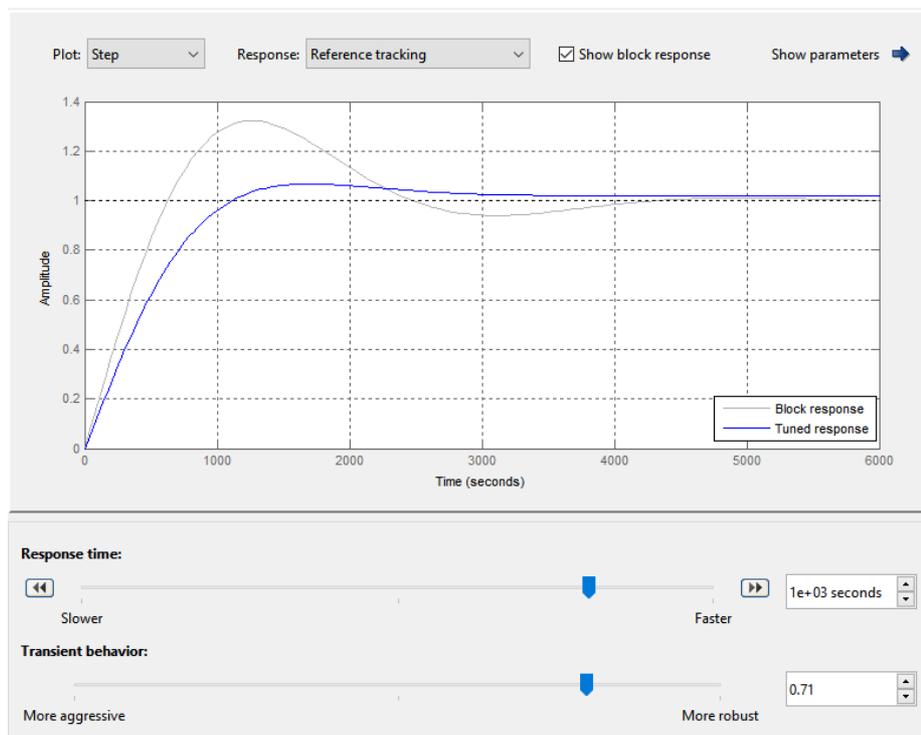


Figura 75. Interfaz de sintonización de controlador.

Continuous-time
 Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Proportional (P): ☐ [Compensator formula](#)
 Integral (I):
 Derivative (D):
 Filter coefficient (N):

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Initial conditions

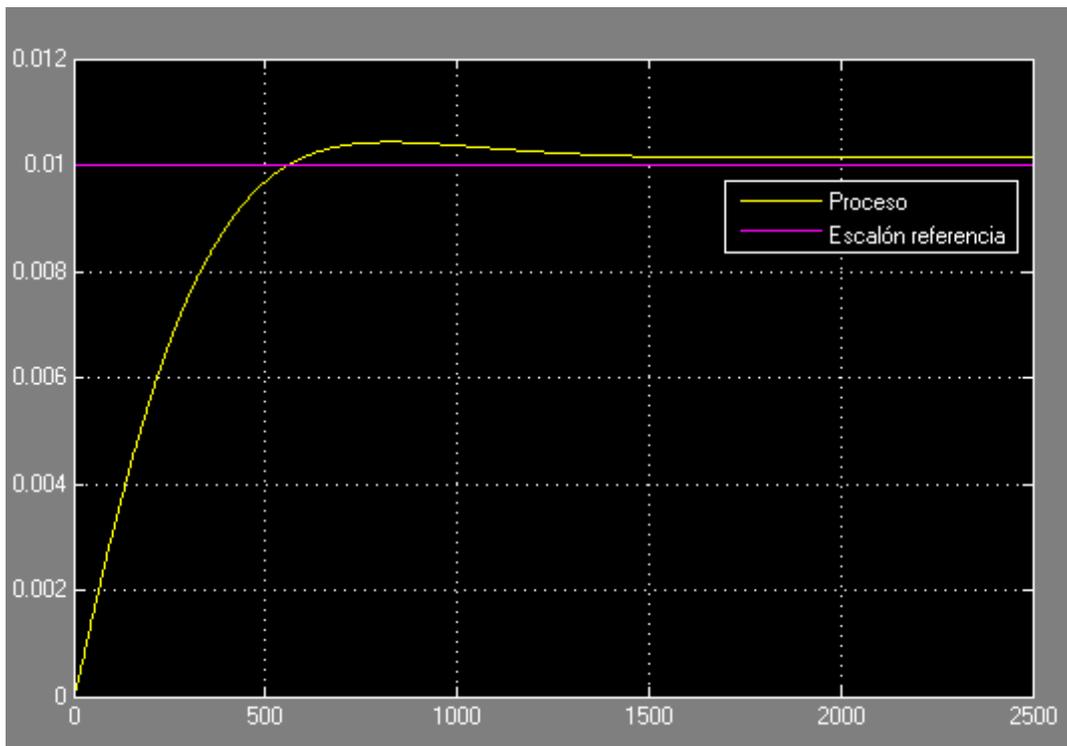
Source:

External reset:

Ignore reset when linearizing
 Enable zero-crossing detection

Figura 76. Parámetros del controlador.

Finalmente, la respuesta temporal del sistema tras introducir el controlador queda de la siguiente forma:



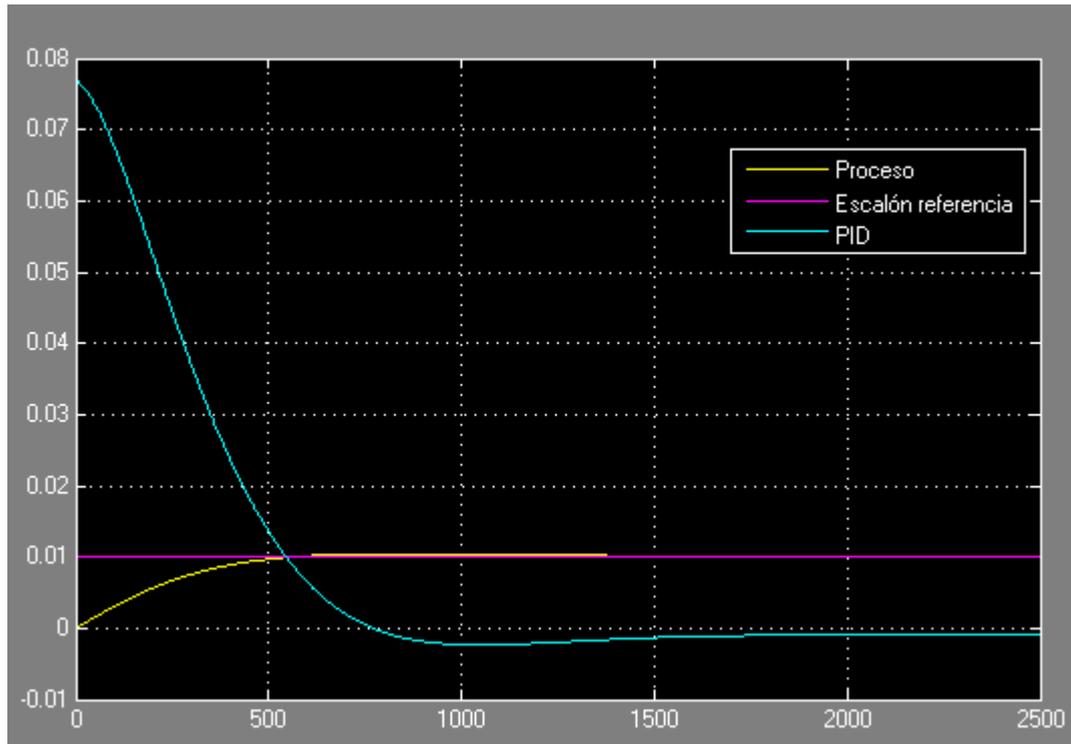


Figura 77. Respuesta temporal del sistema con controlador PID.

Donde pueden apreciarse los efectos del controlador, mejorando sensiblemente tiempo de subida sin introducir demasiada sobreoscilación en el sistema.

6 CONCLUSIONES

A Modo de cierre del proyecto se incluye este capítulo que se compone de dos partes. Una primera en la que se resumen las tareas llevadas a cabo en el desarrollo de este trabajo y cuál es su correspondencia con la documentación real que se entrega en un paquete de ingeniería de I&C.

En la segunda parte, se exponen las conclusiones propiamente dichas acerca de los detalles del trabajo de I&C y sales fundidas.

6.1 Documentación

En el desarrollo de un proyecto existen dos fases propiamente dichas, la ingeniería básica y la ingeniería de detalle. Durante la primera fase de ingeniería básica la documentación que se generará proporcionará la información básica de partida para el trabajo de detalle de las distintas disciplinas que participan en el proyecto: proceso, mecánica (tuberías, equipos estáticos, equipos dinámicos), instalaciones, civil y arquitectura, electricidad e instrumentación.

Toma la información procedente de la Ingeniería Básica, y se desarrolla hasta el grado de detalle suficiente para acometer la construcción del proyecto en la forma que se ha previsto. Durante esta fase del proyecto se generan las especificaciones, hojas de datos, planos, mediciones, etc., para todas las especialidades que el proyecto incluya (movimientos de tierras, cimentaciones y estructuras, instalaciones eléctricas, equipos mecánicos, tuberías, instrumentación y control, etc.), disponiéndose de la documentación necesaria para la compra de todos los equipos y materiales requeridos para la construcción y montaje de las instalaciones del proyecto.

Por supuesto, el nivel alcanzado en la Ingeniería de Detalle está sujeto a los requerimientos del cliente, aunque el objetivo de esta etapa del desarrollo de proyectos suele tener a grandes rasgos los siguientes objetivos:

- Compra de equipos y materiales
- Construcción y montaje de todas las instalaciones
- Obtención de permisos y licencias (*permitting*) que permitan la puesta en marcha y explotación

El proceso en la realidad es mucho más extenso y complejo, pero para el nivel alcanzado en este trabajo es más que válida la separación de estas dos fases.

Algunos de los hitos del trabajo (aquellos relacionados puramente con entregables de ingeniería) son los siguientes:

- Criterio de selección de instrumentos
- Especificación de instrumentos
- Especificación de criterios para válvulas (algunos generales)
- Especificación completa de válvulas
- Diagramas de tubería y proceso (P&ID)
- Dimensionado de válvulas y placa-orificio
- Descripción funcional del sistema
- Descripción del proceso

Recordemos que el objetivo y responsabilidad de los especialistas de instrumentación y control es definir el nivel de automatización de las plantas e instalaciones industriales, la instrumentación de campo y el sistema de control, para conseguir un buen funcionamiento del proceso, dentro del mayor nivel de seguridad para las personas y los equipos y con el menor coste.

Para ello los documentos que se entregan habitualmente son los siguientes:

- Especificación general de instrumentos
- Especificación general de sistemas de control
- Criterios de diseño de Instrumentación
- Lista de instrumentos
- Listas de entradas y salidas a los sistemas de control (Lista de señales)
- Lista de cables de Instrumentación
- Lista de materiales de montaje (BOP, *Bill Of Materials*)
- Diagramas lógicos
- Esquemas de control
- Lazos de control
- Planos de implantación de instrumentos (*layout*)
- Planos de recorrido de bandejas y zanjas de cables (ruteado)
- Planos de sala de control
- Cajas de conexión
- Esquemas de interconexión (diagrama de conexionado)
- Esquemas de montaje a proceso (*hook-up*)
- Esquemas de montaje neumáticos
- Especificaciones de montaje y mediciones de obra
- Hojas de datos de instrumentos y válvulas

De toda esta documentación, vemos que realmente pudieran identificarse alguna en las tareas realizadas, no coincidiendo exactamente con esta. El motivo de haber llevado esta dinámica de trabajo es la de no sólo profundizar en las tareas de I&C sino también conocer a fondo el proceso y lo que entraña. Prueba de ello es que se ha incluido información sobre el proceso puramente y sobre el sistema en sí (el P&ID y la descripción del sistema suele venir dada por la disciplina de Procesos).

Por último, comentar que la disciplina de I&C es de las últimas en entrar en juego en el desarrollo de un proyecto, por lo que se nutre en buena medida del trabajo realizado previamente por otras disciplinas el cual es necesario conocer adecuadamente para poder llevar a término todas las tareas que el instrumentista realiza en el proyecto, recalcando de nuevo lo que se comentaba en la introducción acerca de la riqueza de esta disciplina la cual toca muchos conceptos y disciplinas diferentes.

6.2 Conclusiones

Para concluir, brevemente se exponen algunas conclusiones relacionadas con dificultades para llevar a cabo el trabajo.

La primera de todas es la dificultad para recavar información acerca de plantas en funcionamiento con este tipo de tecnología. Los datos de proceso empleados en cada ocasión son ficticios, sin embargo, son fieles en cuanto a órdenes de magnitud para la aplicación dada.

La tecnología está suficientemente madura para su implantación a nivel comercial, pero no lo suficiente como para tener acceso a un registro de históricos sobre el desarrollo de las mismas tan extensos como pudieran tenerlo otras plantas de potencia como ciclos combinados o convencionales.

Otra dificultad, ligada a lo mencionado anteriormente, es la novedad de las sales calientes. La instrumentación está íntimamente ligada al fluido de proceso. Mientras más conocido sea este, más desarrollada está la

instrumentación concreta para ese fluido. Por ejemplo, es muy diferente especificar un manómetro para agua que para sales fundidas por la razón comentada aparte de las condiciones tan agresivas que tiene este fluido proceso. Como se comentó en el apartado de sales fundidas, las sales presentan en muchos aspectos muchos quebraderos de cabeza.

A pesar de ser un fluido que debido a sus propiedades (muy baja presión de vapor) no debería producir ni *flashing* ni cavitación, provoca daños devastadores en internos de las válvulas y, en general, en toda parte de instrumentación que está bañada por sales. Otro ejemplo de problemática que se presenta son también los materiales que se emplean para estas partes. En sales calientes, a la salida del receptor, las sales se hayan nada menos que a 560 °C. A esta temperatura, la selección de un material u otro para los sellos separadores de los transmisores de presión (por ejemplo) es motivo de debate incluso dentro de empresas dedicadas al sector, por lo que toda esta problemática, se ha trasladado consecuentemente al proyecto, en el que se han tratado temas que empresas especializadas e incluso proveedores aun tratan de mejorar y optimizar.

Recalcar, por último, la dificultad de realizar un modelo que no se ha podido validar, ya que no se ha tenido acceso a datos de funcionamiento que dieran pie a ello. Lo que se pretende que quede claro, más que perseguir exactitud de resultados, es mostrar la metodología, la cual es más efectiva mientras se tenga información más fidedigna del resto de disciplinas, algo que incluso en proyectos reales, no se llega a tener con absoluta certeza, ya que hasta el momento de la verdad (comisionado y puesta en marcha) no se pueden apreciar los resultados de una buena ingeniería.

REFERENCIAS

- [1] S. García Garrido, «Principios de funcionamiento de las centrales solares termoeléctricas,» de *Guía técnica de la energía solar termoeléctrica*, Madrid, Madrid Solar, 2012, pp. 13-50.
- [2] Renovetec, «Curso técnico general de centrales termosolares,» Madrid, Renovetec, 2015.
- [3] Torresol Energy, «Funcionamiento de Valle 1 y Valle 2,» 10 Octubre 2015. [En línea]. Available: <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/plantas-valle1-valle2/es>.
- [4] Renovetec, «Principales Equipos y sistemas en centrales CCP,» Renovetec, 2014.
- [5] National Renewable Energy Laboratory, «<http://www.nrel.gov>,» 2015. [En línea]. Available: http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=159.
- [6] Solar Paces, «National Renewable Energy Laboratory,» 26 Abril 2013. [En línea]. Available: http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=159. [Último acceso: 22 Noviembre 2015].
- [7] S. Remke, «Almacenamiento de energía térmica,» de *Guía del almacenamiento de energía*, Madrid, Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, 2010, pp. 65-84.
- [8] P. Karhade, «Blogs on sustainability,» 2015. [En línea]. Available: <http://prashantkarhade.com/>. [Último acceso: 25 Diciembre 2015].
- [9] J. I. Burgaleta, S. Arias y D. Ramírez, «Gemasolar, the first tower thermosolar commercial plant with molten salt storage,» *SolarPaces Paper*, p. 8, 2011.
- [10] D. Santiago Arias, «Gemasolar: generación 24 horas al día mediante torre central y almacenamiento en sales fundidas,» de *Guía técnica de la energía solar termoeléctrica*, Madrid, Madrid Solar, 2012, pp. 169-198.
- [11] G. Glatzmaier, «New concepts and materials for thermal energy storage and heat transfer fluids,» de *Concentrating solar power workshop*, 2011.
- [12] R. Bayón, «Almacenar Electricidad en sales fundidas,» de *Seminario de Gestión Ambiental (CIEMAT)*, Pamplona, 2014.
- [13] Nuclear Energy Agency/International Energy Agency/Organization for Economic Cooperation and Development, «Projected Costs of Generating Electricity,» 2005.
- [14] OPEXenergy, «Operación y Mantenimiento de plantas de energía (OPEXenergy),» 18 Octubre 2015. [En línea]. Available: <http://opex-energy.com/termosolares>.
- [15] T. Sánchez Lencero y A. Muñoz Blanco, *El ciclo básico de la turbina de vapor*, Sevilla: Grupo de Motores

Térmicos ESI Sevilla (GMTS), 2013.

- [16] ISA, «Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems,» Instrument Society of America (ISA), North Carolina, 1982.
- [17] ISA, «Instrumentation Symbols and Identification,» Instrument Society of America (ISA), North Carolina, 1992.
- [18] A. C. Solé, «Código e identificación de instrumentos,» de *Instrumentación industrial*, México D.F., Alfaomega, 2008, pp. 26-63.
- [19] J. Rivas, «Generalidades sobre instrumentos,» de *Instrumentación y control: Generalidades*, Madrid, Master ISA de Instrumentación y control, 2007, pp. 1-18.
- [20] A. C. Solé, «Transmisores,» de *Instrumentación Industrial*, México D.F., Alfaomega, 2011, pp. 63-68.
- [21] A. Creus Solé, «Instrumentación Industrial,» Barcelona, Marcombo, 2005, pp. 71-87.
- [22] IDC Technologies, «Practical Instrumentation for automation & process control,» Madrid (Alcalá de Henares), IDC Technologies, 2004, pp. 25-50.
- [23] M. Jover Urquiza, «Medida de Presión,» de *Master ISA-ISE de instrumentación y control*, vol. 2A. Variables de proceso, Madrid, ISA Sección española, 2007.
- [24] G. Villalobos Ordaz, R. Rico Romero, F. Eli Ortiz Hernández y M. A. Montúfar Navarro, «Medición y control de procesos industriales,» México, DF., Instituto Politécnico Nacional, 2006, pp. 186-201.
- [25] J. A. Sánchez, «Medidas de temperatura,» de *Control Avanzado de Procesos*, Madrid, Díaz de Santos, 2003, pp. 67-84.
- [26] J. A. Sánchez, «Medidas de temperatura,» de *Variables de proceso*, Madrid, Master ISA-ISE de instrumentación y control, 2007, pp. 1-32.
- [27] WIKA, «Instrumentación de temperatura eléctrica,» de *Documentación técnica WIKA*, Barcelona, 2012, pp. 1-6.
- [28] U.S. Department of Energy, «Instrumentation and control, Module 4: Flow Detectors,» de *DOE Fundamentals Handbook*, Washington, D.C., U.S. Department of Energy, 1992, pp. 1-19.
- [29] J. Acedo Sánchez, «Medidas de caudal,» de *Master ISA-ISE de instrumentación y control*, vol. 2A. Variables de proceso, Madrid, ISA Sección española, 2007, pp. 1-22.
- [30] J. Saucedo Sánchez, «Montaje de instrumentos en campo,» de *Control Avanzado de Procesos*, Madrid, Díaz de Santos, 2003, pp. 101-107.
- [31] W. Boyes, «Measurement of Flow,» de *Instrumentation Reference Book*, 3ª ed., Burlington, Butterworth Heinemann, 2003, pp. 3-45.
- [32] A. C. Solé, «Medición de nivel,» de *Instrumentación Industrial*, México D.F., Alfaomega, 2011, pp. 195-230.
- [33] Rosemount, «Descripción técnica de TankRadar PRO,» de *Documentación técnica Rosemount*, 2007, pp. 1-36.

- [34] M. J. Urquiza, «Medida de nivel,» de *Medida de variables de proceso*, Madrid, Master ISA-ISE de instrumentación y control, 2007, pp. 1-43.
- [35] A. Campo López, «Válvulas de Control,» de *Master ISA-ISE de instrumentación y control*, Madrid, ISA Sección Española, 2007, pp. 1-31.
- [36] ISA, «75.05.01–2000,» ISA, North Carolina, 2000.
- [37] A. C. Solé, «Elementos finales de control,» de *Instrumentación Industrial*, México D.F., Alfaomega, 2010, pp. 381-497.
- [38] J. A. Sánchez, «Elementos finales de control,» de *Control avanzado de procesos*.
- [39] J. R. Vignoni, «Válvulas de control,» de *Instrumentación y comunicaciones industriales*, 2005, pp. 1-18.
- [40] Swagelok, «Valve Sizing,» *Swagelok Company Technical Bulletin*, pp. 1-12, 2007.
- [41] A. C. López, «Cálculo y Especificación de Válvulas de control,» de *Elementos Finales de Control*, ISA, 2007, pp. 1-55.
- [42] Varios, «ASME B16.5».
- [43] G. Bard, *Optimum Process Performances*.
- [44] K. Ogata, «Linealización de modelos matemáticos no lineales,» de *Ingeniería de control moderna*, México, Pearson, 1998, pp. 100-105.
- [45] F. A. Ocaña, «Apuntes de prácticas: Ajuste de una función potencial,» Universidad de Granada, Granada.
- [46] A. C. Solé, «Apéndice A. Análisis dinámico de instrumentos,» de *Instrumentación Industrial*, México D.F, Alfaomega, 2010, p. 702.
- [47] K. Ogata, «Efectos de las acciones de control integral y derivativa en el comportamiento de sistemas,» de *Ingeniería de control moderna*, Madrid, Pearson, 2010, pp. 212-218.
- [48] R. G. Martín, «Control básico y sintonía de controladores PID,» de *Control Básico*, Madrid, Master ISA-ISA de instrumentación y control, 2007, pp. 1-36.
- [49] A. Aynat Piquer, «Determinación del ciclo de vapor de una central solar termoeléctrica CCP de 50 MW,» *Trabajo fin de grado*, pp. 56-66, 2012.
- [50] A. Campo López, «La válvula como equipo mecánico,» de *Master ISA-ISE de instrumentación y control*, Madrid, ISA Sección Española, 2007, pp. 1-49.
- [51] A. Campo López, «Cálculo y Especificación de Válvulas de control,» de *Master ISA-ISE de instrumentación y control*, Madrid, ISA Sección Española, 2007, pp. 1-55.
- [52] R. W. Greene, «Válvulas: selección, uso y mantenimiento,» McGraw-Hill.
- [53] J. A. Iniesta López, «Proyecto de ingeniería de detalle,» de *Master ISA-ISE de instrumentación y control*, vol. 5. Ingeniería de instrumentación, Madrid, ISA Sección Española, 2007, pp. 1-22.

[54] J. Acedo Sánchez, «Medidas de caudal».

[55] L. K. Spink, «Principles and Practice of Flowmeter Engineering,» The Foxboro Company, 1993.

[56] J. Acedo Sánchez, «Medidas de Caudal,» de *Control Avanzado de Procesos*, Madrid, Díaz de Santos, 2003, pp. 3-20.

[57] A. Muñoz Blanco y T. Sánchez Lencero, El ciclo básico de la turbina de vapor, Sevilla: Apuntes de la asignatura "Máquinas y motores térmicos", 2013.

ANEXO I. DIMENSIONADO DE PLACA ORIFICIO

En el siguiente anexo se describe el proceso de computación requerido para el dimensionado de placas orificio. La norma ISO 5167-1 define el proceso de iteración descrito.

Se requiere un método iterativo para calcular:

- q_m , dados unos valores de μ , ρ , D , Δp y d
- d y β dados unos valores de μ , ρ , D , Δp y q_m
- Δp dados unos valores de μ , ρ , D , y d
- D y d dados unos valores de μ , ρ , β , Δp y q_m

Para el caso bajo estudio, se pretenden obtener los parámetros d y β por lo que como datos de entrada se han de conocer los que indican el segundo caso de los enumerados.

El principio del método es agrupar en un miembro todos los elementos conocidos acorde a la ecuación básica de caudal:

$$q_m = C\varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 (1 - \beta^4)^{-0,5} (2\Delta p \rho)^{0,5}$$

Y situar en el otro lado aquellos parámetros que se desconocen. El miembro conocido será el término invariable del problema.

Se introduce una primera aproximación X_1 en el miembro desconocido, obteniéndose una diferencia δ_1 entre los dos miembros. La iteración mediante métodos de computación permite obtener una segunda aproximación X_2 para sustituir y obtener de nuevo una diferencia δ_2 .

X_1 , X_2 , δ_1 y δ_2 se introducen en un algoritmo lineal obteniendo $X_3 \dots X_n$ y $\delta_1 \dots \delta_n$ hasta que $|\delta_n|$ es más pequeño que un determinado valor o hasta que dos valores sucesivos de X o δ se consideran iguales dada una determinada precisión. Un algoritmo de rápida convergencia es el siguiente:

$$X_n = X_{n-1} - \delta_{n-1} \frac{X_{n-1} - X_{n-2}}{\delta_{n-1} - \delta_{n-2}}$$

El cual, si es llevado a cabo mediante cálculo numérico, al ser un algoritmo lineal, reducirá notablemente el número de operaciones. La secuencia de operaciones de lo anteriormente explicado sería la siguiente:

- Valores de μ , ρ , D , Δp y q_m conocidos.
- Definir término invariable como:

$$A_2 = \frac{\mu Re(D)}{D \sqrt{2\Delta p \rho}}$$

- Ecuación iterativa:

$$\frac{A_2}{C\varepsilon} = \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} = X_2$$

- Criterio de precisión:

$$\left| \frac{A_2 - X_2 C \varepsilon}{A_2} \right| < 1 \times 10^{-n}$$

Siendo n fijado por el usuario.

- Para la primera aproximación: $C = 0,606$ y $\varepsilon = 0,97$ ó 1 para líquidos
- Finalmente:

$$d = D \left(\frac{X_2^2}{1 - X_2^2} \right)^{0,25}$$

Particularizando el caso bajo estudio:

Caudal	500	kg/h
Presión	10,84	bar g
Temperatura	25	°C
Densidad	0,98	kg/m ³
Viscosidad	0,02	cP
Caída de presión	0,2	bar

El método puede implementarse de la siguiente forma:

1. Se toma un valor inicial de β (se analiza un rango de valores desde 0 a 1)
2. Se calculan los parámetros, acorde a las ecuaciones de la norma ISO
3. Se comprueba la condición de salida con los valores que se calculan de β , si no cumple, se incrementa ese valor con un paso muy pequeño.

Traducido a código (Matlab) la implementación queda de la siguiente forma:

```

%% Cálculo de placas orificio
%% Datos de entrada
q_m= 500;           % kg/h
mu_1=0.02;         % cP
D=54.8640;         % mm
Delta_p=0.2*10^5;  % Pa
ro=0.98;           % kg/m^3
P=10.84;           % bar
%Se halla Re_D con unidades adecuadas
Re_D=353.678*(q_m/(mu_1*D));

% El valor de A_2 permanece constante
A_2=(mu_1*Re_D)/(D*sqrt(2*Delta_p*ro));

%Valores iniciales
error=1;
epsilon= 0.97;     % en el caso de líquidos se pone 1
C=0.606;

%Se van probando valores de beta hasta que se cumple la condición
for beta=0:0.00001:1
    X_2=beta^2/(sqrt(1-beta^4));
    error=abs((A_2-X_2*C*epsilon)/(A_2));
    if (error<10^-1)
        break
    else

```

```

end
end
%Resultados
beta
d=D*(X_2^2/(1+X_2^2))^0.25

```

Obteniéndose unos valores de β y d:

$$\beta = 0.64315$$

$$d = 35.2857816 \text{ mm}$$

Para validar el método empleado, se comprueba mediante un programa específico de cálculo de placas orificio (InstruCalc):

Ver.7.1.75. ISO Orifice Plate - Concentric - Flange Taps - Gas Flow

File Set up Units Fluid properties Calculations Drain/Vent Hole Base Transfer Help

Input data			Output data		
Tag	20-FE-001	Fluid	Air	Beta ratio	.635679
Maximum gas flow	kg/h	500	Reynolds number	161135	
Normal gas flow	kg/h	500	Max pressure loss mmH2O	1491	
Differential range	mmH2O	2500	Max power loss hp	2.782	
Viscosity @ FTP	cp	.02	Min plate thickness in	.125	
Inlet pressure	barg	10.84	Uncertainty percent	.6182	
Molecular weight		28.9	Normal differential mmH2O	2500	
Cp/Cv specific heat ratio		1.4	Max. diff. range mmH2O	24017	
Flow temperature	degC	25	Calculation factors @ normal flow		
Pipe ID	mm	54.864	Thermal expansion	1.00007	
Density @ FTP	kg/m3	.98	Discharge coefficient	.611363	
Element material		304 Stainless steel	Gas expansion	.993111	
Pipe material		Carbon steel	Base pressure factor	1	
Calculated option data			Base temperature fact.	1	
Orifice diameter	in	1.37306	<input type="button" value="Calculate"/> <div style="float: right;"> 09/01/2016 By GRM App JRM </div>		

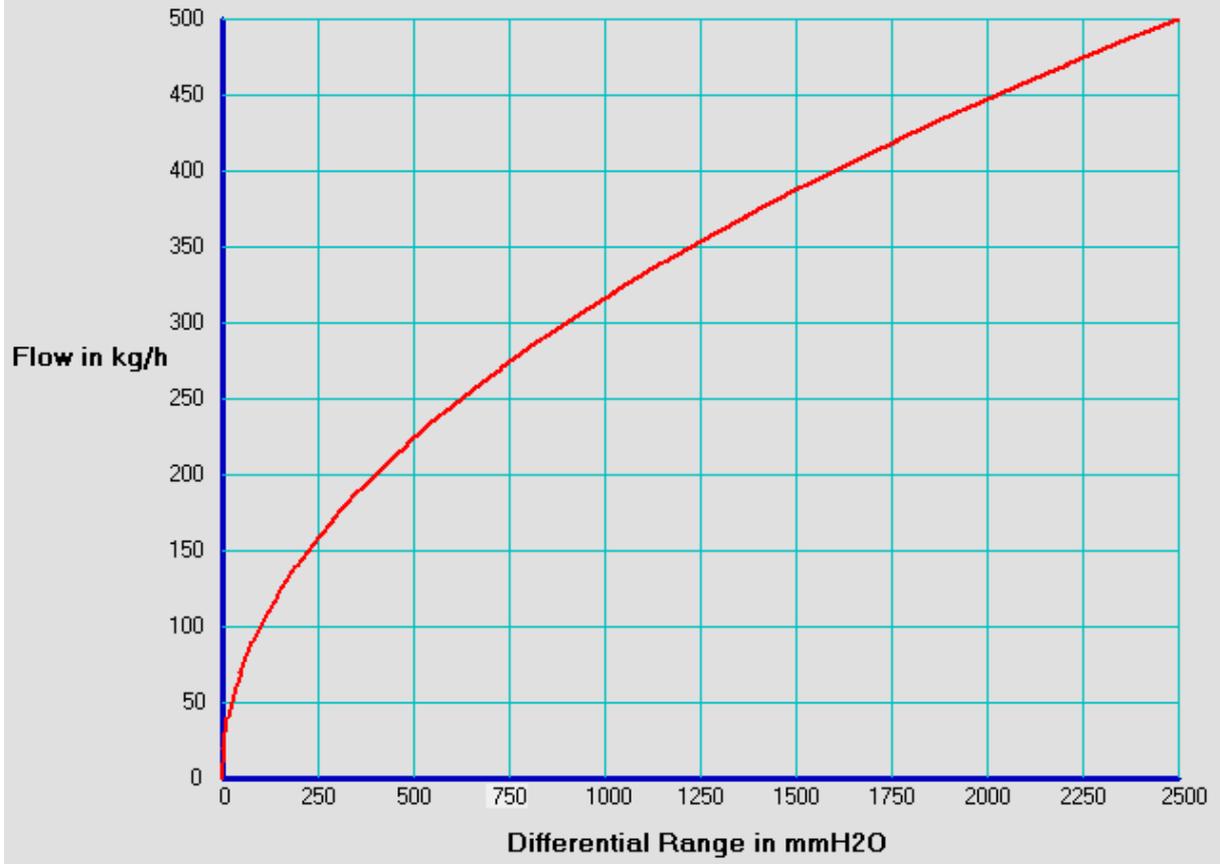
Con el que se obtienen los siguientes valores:

$$\beta = 0.635679$$

$$d = 34,8757 \text{ mm}$$

A modo informativo, se representa el caudal en kg/h frente al fondo de escala, para tener una noción de si la rangeabilidad es la adecuada (se vio que en placas orificio aproximadamente se tenía un 3:1).

Flow and Differential



ANEXO II. DIMENSIONADO DE VÁLVULA

En este anexo se desarrolla el método que la ISA (ISA – 75.01.01-2007) establece para calcular el coeficiente de flujo de válvulas de control. En la norma, se establecen las ecuaciones a emplear, así como las definiciones de los elementos y coeficientes que aparecen en ellas y la manera de calcularlos.

El método varía en función de si se emplea la hipótesis de fluido compresible o incompresible. En el caso bajo estudio, a las válvulas de sales les aplica la hipótesis de fluido incompresible, al estar el fluido de proceso en estado líquido y a la válvula de aire comprimido la de fluido compresible, por lo que se desarrollarán los dos casos que expone la norma.

Ecuaciones de dimensionado para fluidos incompresibles

El coeficiente de flujo se calcula acorde a las siguientes ecuaciones, recogidas en la Tabla 14 acorde a las condiciones que se den:

Turbulento	No crítico	Sin accesorios	$C_V = \frac{Q}{N_1} \sqrt{\frac{\rho_1/\rho_0}{\Delta P}}$	1
		Con accesorios	$C_V = \frac{Q}{N_1 F_P} \sqrt{\frac{\rho_1/\rho_0}{\Delta P}}$	2
	Crítico	Sin accesorios	$C_V = \frac{Q}{N_1 F_L} \sqrt{\frac{\rho_1/\rho_0}{P_1 - F_F P_V}}$	3
		Con accesorios	$C_V = \frac{Q}{N_1 F_{LP}} \sqrt{\frac{\rho_1/\rho_0}{P_1 - F_F P_V}}$	4
No turbulento	Sin accesorios		$C_V = \frac{Q}{N_1 F_R} \sqrt{\frac{\rho_1/\rho_0}{\Delta P}}$	5
	Con accesorios		-	

Tabla 14. Ecuaciones de Cv.

A continuación, se definen los parámetros que aparecen en las ecuaciones. Estos parámetros están relacionados con los tipos de derrames y fenómenos físicos mencionados anteriormente.

- F_L : factor de recuperación de presión del líquido.

Este factor modela la influencia de la geometría interna de la válvula en la capacidad de la válvula cuando hay caudal crítico. Se define como el ratio entre el máximo caudal bajo condiciones de caudal crítico y el caudal que se calcularía si la presión diferencial utilizada fuese la diferencia entre la presión de entrada a la válvula y la presión en la vena contracta aparente bajo condiciones de caudal crítico.

Este factor se determina mediante tests acordes a la ANSI/ISA-75.02-1996. Los valores de este parámetro se

muestran en la Tabla 15. Este factor es importante ya que da una idea de la capacidad de recuperación de la válvula; mientras tenga un perfil interno más suave (sector de bola, mariposa) más capacidad de recuperación tendrá.

- F_F : factor de presión crítica

Este factor se define como el ratio entre la presión en la vena contracta bajo condiciones de caudal crítico y la presión de vapor del líquido a la temperatura de entrada. Para presiones de vapor cercanas a cero, este factor toma el valor constante de 0,97. De no ser así se puede aproximar mediante la siguiente ecuación:

$$F_F = 0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{P_V}{P_C}} \quad (6)$$

O mediante la siguiente gráfica:

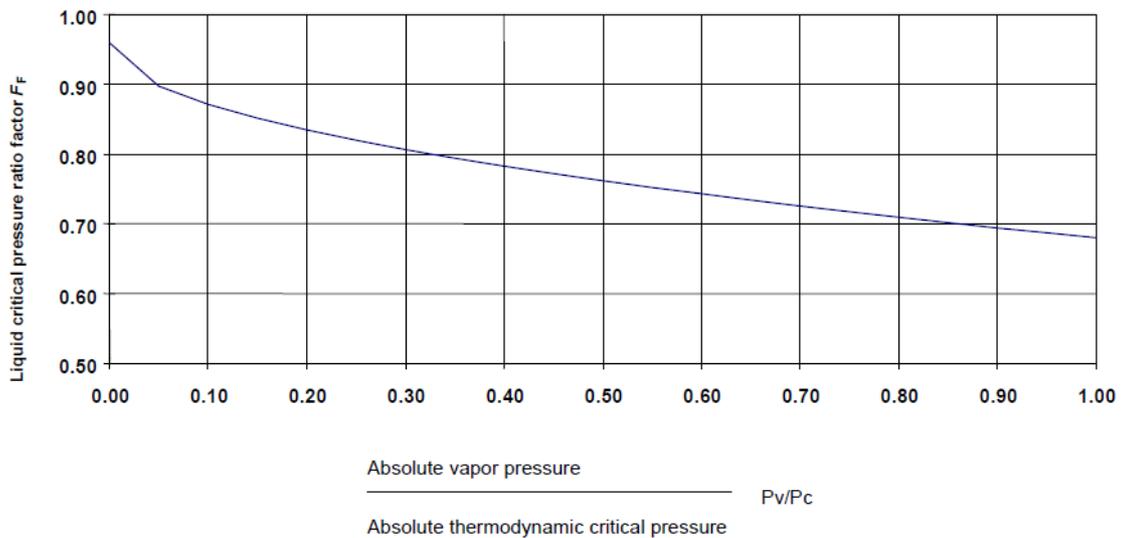


Figura 78. Factor F_F frente a relación P_V/P_C .

- F_p : factor geométrico de la tubería.

Este factor es necesario para tener en cuenta los accesorios aguas arriba y/o aguas abajo al cuerpo de la válvula de control. Se define como el ratio entre el caudal que circula por la válvula con accesorios entre el que resultaría si la válvula estuviese instalada sin accesorios y bajo condiciones que no produjesen *caudal crítico*.

Para cumplir una tolerancia de $\pm 5\%$, este factor debe ser determinado experimentalmente acorde a ANSI/ISA-75.02-1996. La ecuación que permite hallar el factor es la siguiente:

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum \xi}{N_2} \left(\frac{C_i}{d^2}\right)^2}} \quad (7)$$

Los sumandos del término ξ variarán en función de los accesorios.

- F_d : modificador del tipo de válvula

Se define como el cociente del radio hidráulico de un orificio de paso de caudal entre el radio de un orificio circular. Los valores típicos de este parámetro se recogen en la siguiente tabla.

Valve type	Trim type	Flow direction ²⁾	F_L	x_T	F_d
Globe, single port	3 V-port plug	Open or close	0.9	0.70	0.48
	4 V-port plug	Open or close	0.9	0.70	0.41
	6 V-port plug	Open or close	0.9	0.70	0.30
	Contoured plug (linear and equal percentage)	Open	0.9	0.72	0.46
		Close	0.8	0.55	1.00
	60 equal diameter hole drilled cage	Outward ³⁾ or Inward ³⁾	0.9	0.68	0.13
	120 equal diameter hole drilled cage	Outward ³⁾ or Inward ³⁾	0.9	0.68	0.09
Characterized cage, 4-port	Outward ³⁾	0.9	0.75	0.41	
	Inward ³⁾	0.85	0.70	0.41	
Globe, double port	Ported plug	Inlet between seats	0.9	0.75	0.28
	Contoured plug	Either direction	0.85	0.70	0.32
Globe, angle	Contoured plug (linear and equal percentage)	Open	0.9	0.72	0.46
		Close	0.8	0.65	1.00
	Characterized cage, 4-port	Outward ³⁾	0.9	0.65	0.41
		Inward ³⁾	0.85	0.60	0.41
	Venturi	Close	0.5	0.20	1.00
Globe, small flow trim	V-notch	Open	0.98	0.84	0.70
	Flat seat (short travel)	Close	0.85	0.70	0.30
	Tapered needle	Open	0.95	0.84	$N_{10} \frac{(CF_L)^{0.5}}{D_o}$
Rotary	Eccentric spherical plug	Open	0.85	0.60	0.42
		Close	0.68	0.40	0.42
	Eccentric conical plug	Open	0.77	0.54	0.44
		Close	0.79	0.55	0.44
Butterfly (centered shaft)	Swing-through (70°)	Either	0.62	0.35	0.57
	Swing-through (60°)	Either	0.70	0.42	0.50
	Fluted vane (70°)	Either	0.67	0.38	0.30
High Performance Butterfly (eccentric shaft)	Offset seat (70°)	Either	0.67	0.35	0.57
Ball	Full bore (70°)	Either	0.74	0.42	0.99
	Segmented ball	Either	0.60	0.30	0.98

1) These values are typical only; actual values shall be stated by the valve manufacturer.
2) Flow tends to open or close the valve, i.e. push the closure device (plug, ball, or disc) away from or towards the seat.
3) Outward means flow from center of cage to outside, and inward means flow from outside of cage to center.

Tabla 15. Valores típicos de F_L , x_T y F_d .

- F_R : factor de número de Reynolds

Se requiere cuando se establece un régimen no turbulento a través de una válvula de control debido a un bajo diferencial de presión, una alta viscosidad o un bajo coeficiente de flujo, o una combinación de lo anterior.

El factor se define como el cociente el caudal cuando hay régimen no turbulento entre el caudal medido en la misma instalación en régimen turbulento.

Experimentalmente, se demuestra que F_R se puede hallar mediante curvas empleando el número de Reynolds según la siguiente ecuación:

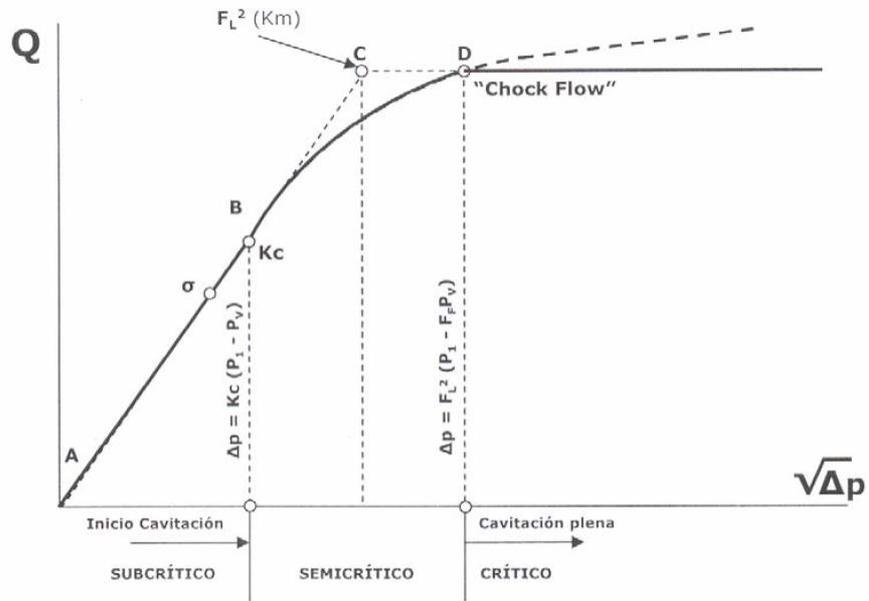
$$Re_v = \frac{N_4 F_d Q}{v \sqrt{C_i F_L}} \left(\frac{F_L^2 C_i^2}{N_2 D^4} + 1 \right)^{1/4} \quad (8)$$

El cálculo requiere iteración. El método de cálculo lleva implementado este proceso.

- ΔP crítica: diferencial de presión por encima del cual se produce caudal crítico. En la norma, no se contempla este valor como un parámetro en sí.

$$\Delta P = F_L^2 (P_1 - F_F P_V) \quad (9)$$

En la siguiente figura se puede ver con mayor claridad el significado de este parámetro:



Representando Q frente a $\sqrt{\Delta P}$ se puede apreciar que este valor de pérdida de carga marca el inicio de la cavitación completa.

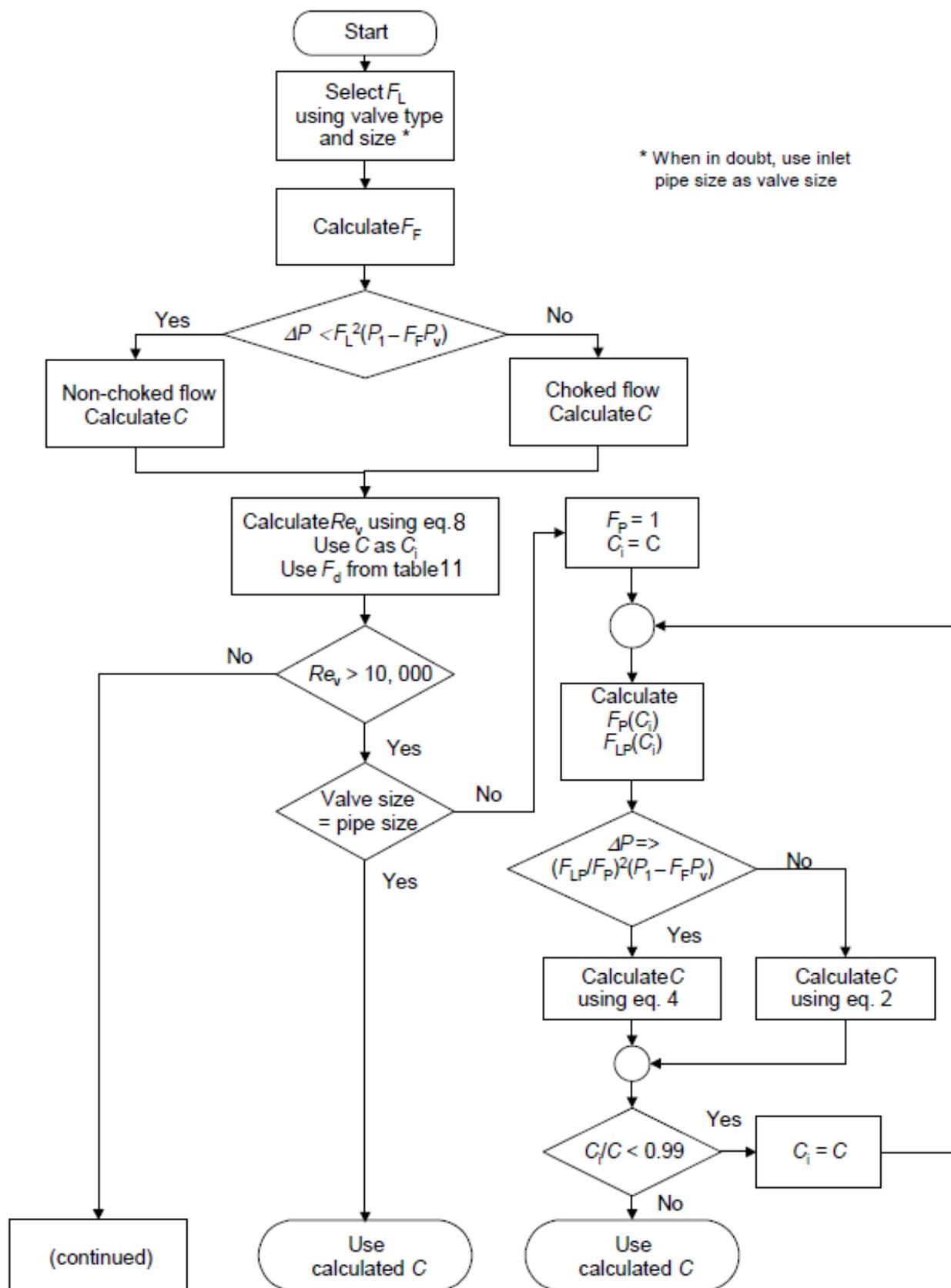
Por último, se muestran los valores de las constantes numéricas empleadas en el cálculo de los parámetros:

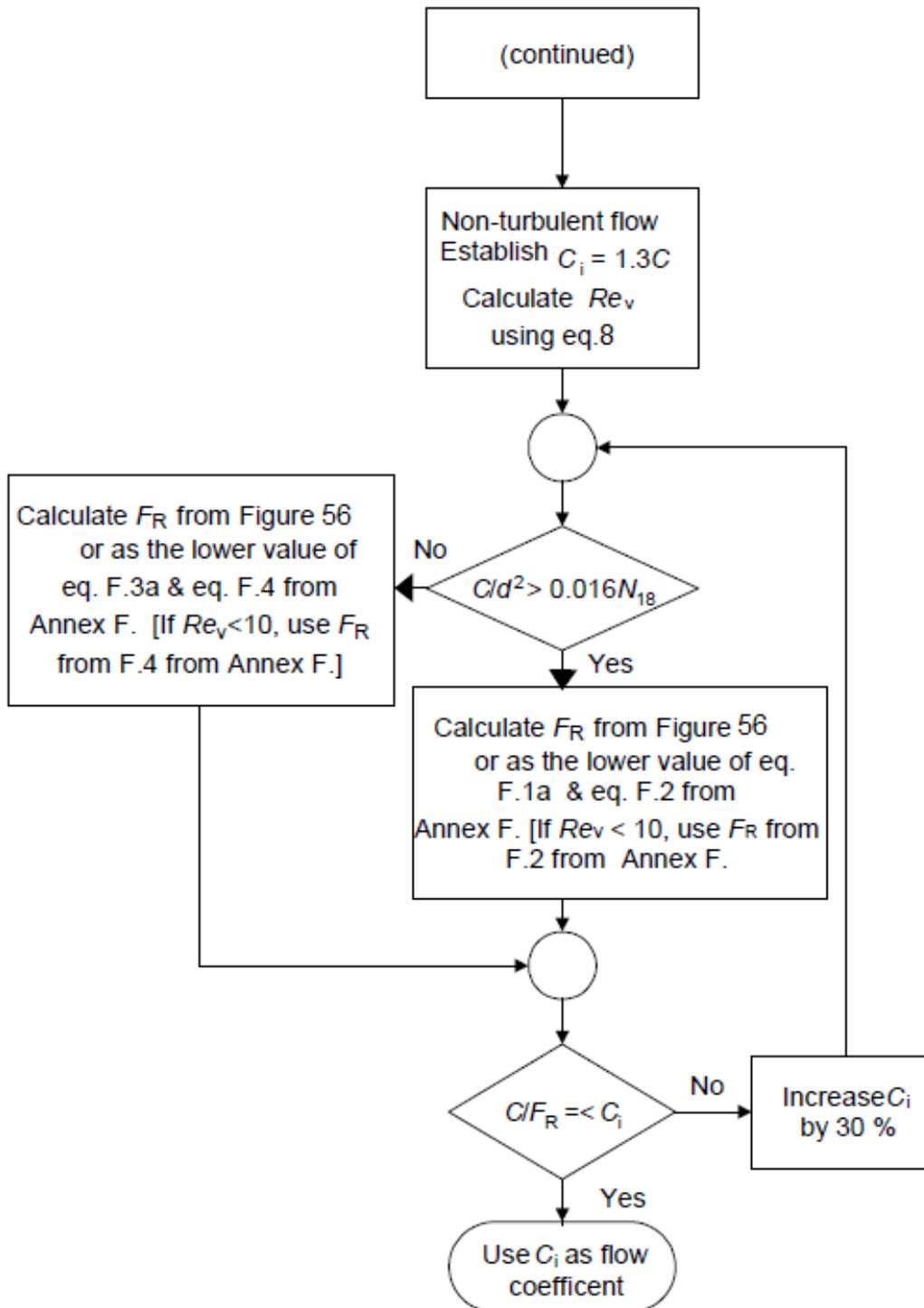
Constant	Flow coefficient C		Formulae unit						
	K_v	C_v	W	Q	$P, \Delta P$	ρ	T	d, D	v
N_1	1×10^{-1}	8.65×10^{-2}	–	m ³ /h	kPa	–	–	–	–
	1	8.65×10^{-1}	–	m ³ /h	bar	–	–	–	–
		1	–	gpm	psia	–	–	–	–
N_2	1.60×10^{-3}	2.14×10^{-3}	–	–	–	–	–	mm	–
		8.90×10^2	–	–	–	–	–	in	–
N_4	7.07×10^{-2}	7.60×10^{-2}	–	m ³ /h	–	–	–	–	m ² /s
		1.73×10^4	–	gpm	–	–	–	–	cS
		2.153×10^3	–	scfh	–	–	–	–	cS
N_5	1.80×10^{-3}	2.41×10^{-3}	–	–	–	–	–	mm	–
		1.00×10^3	–	–	–	–	–	in	–
N_6	3.16	2.73	kg/h	–	kPa	kg/m ³	–	–	–
	3.16×10^1	2.73×10^1	kg/h	–	bar	kg/m ³	–	–	–
		6.33×10^1	lbm/h	–	psia	lbm/ft ³	–	–	–
N_7 ($t = 15.6^\circ\text{C}$)	4.82	4.17	–	m ³ /h	kPa	–	–K	–	–
	4.82×10^2	4.17×10^2	–	m ³ /h	bar	–	–K	–	–
		1.36×10^3	–	scfh	psia	–	–R	–	–
N_8	1.10	9.48×10^{-1}	kg/h	–	kPa	–	K	–	–
	1.10×10^2	9.48×10^1	kg/h	–	bar	–	K	–	–
		1.93×10^1	lbm/h	–	psia	–	R	–	–
N_9 ($t = 0^\circ\text{C}$)	2.46×10^1	2.12×10^1	–	m ³ /h	kPa	–	K	–	–
	2.46×10^3	2.12×10^3	–	m ³ /h	bar	–	K	–	–
		6.94×10^3	–	scfh	psia	–	R	–	–
N_9 ($t_s = 15^\circ\text{C}$)	2.60×10^1	2.25×10^1	–	m ³ /h	kPa	–	K	–	–
	2.60×10^3	2.25×10^3	–	m ³ /h	bar	–	K	–	–
		7.32×10^3	–	scfh	psia	–	R	–	–
N_{18}	8.65×10^{-1}	1.00	–	–	–	–	–	mm	–
		6.45×10^2	–	–	–	–	–	in	–
N_{19}	2.5	2.3	–	–	–	–	–	mm	–
		9.06×10^{-2}	–	–	–	–	–	in	–
N_{22} ($t_s = 0^\circ\text{C}$)	1.73×10^1	1.50×10^1	–	m ³ /h	kPa	–	K	–	–
	1.73×10^3	1.50×10^3	–	m ³ /h	bar	–	K	–	–
		4.92×10^3	–	scfh	psia	–	R	–	–
N_{22} ($t_s = 15^\circ\text{C}$)	1.84×10^1	1.59×10^1	–	m ³ /h	kPa	–	K	–	–
	1.84×10^3	1.59×10^3	–	m ³ /h	bar	–	K	–	–
		5.20×10^3	–	scfh	psia	–	R	–	–
N_{27} ($t_s = 0^\circ\text{C}$)	7.75×10^{-1}	6.70×10^{-1}	kg/h	–	kPa	–	K	–	–
	7.75×10^1	6.70×10^1	kg/h	–	bar	–	K	–	–
		1.37×10^1	lbm/h	–	psia	–	R	–	–
N_{32}	1.40×10^2	1.27×10^2	–	–	–	–	–	mm	–
		1.70×10^1	–	–	–	–	–	in	–

NOTE Use of the numerical constants provided in this table together with the practical metric and US units specified in the table will yield flow coefficients in the units in which they are defined.

Tabla 16. Valores de constantes numéricas.

Finalmente, se muestra el diagrama de flujo que muestra los pasos a dar en el cálculo del coeficiente de flujo. Este modo de proceder, contempla los fenómenos estudiados y las implicaciones que tiene sobre el tipo de válvula seleccionado.





Se adjuntan finalmente las ecuaciones del anexo F de la norma, a las que se hace referencia en la continuación del diagrama de flujo:

F.1a	$F_R = 1 \left(\frac{0,33F_L^{1/2}}{n_1^{1/4}} \right) \log_{10} \left(\frac{Re_V}{10000} \right)$
F.1b	$n_1 = \frac{N_2}{\left(\frac{C_i}{d^2} \right)^2}$
F.2	$F_R = \frac{0,026}{F_L} \sqrt{n_1 Re_V} \quad (F_R < 1)$
F.3a	$F_R = 1 \left(\frac{0,33F_L^{1/2}}{n_2^{1/4}} \right) \log_{10} \left(\frac{Re_V}{10000} \right)$
F.3b	$n_2 = 1 + N_{32} \left(\frac{C_i}{d^2} \right)^2$

Tabla 17. Ecuaciones del anexo F.

- Cálculo de Cv para régimen de caudal normal 10-PV-002

Datos de proceso:

Caudal	200000	kg/h
Presión Entrada	7	bar a
Caida de Presión (ΔP)	5	bar
Temperatura	290	° C
Densidad	1900	kg/ m ³
Viscosidad	1,5	cP
Presión de vapor	0,004	bar a
Diámetro de la línea	10	in

El cuerpo de la válvula es tipo globo por lo que de Tabla 15 se obtienen los siguientes parámetros:

- $F_L=0,9$

- $F_d=0,46$

Una vez seleccionado F_L se calcula F_F . Como la presión de vapor es cercana a 0, se toma $F_F = 0,96$.

A continuación, se halla el valor límite de caída de presión que marca la presencia de *caudal crítico*.

$$F_L^2 (P_1 - F_F P_V) = 4,8924 < 5$$

No se produce caudal crítico, por lo que se halla el coeficiente de flujo según la ecuación 1. Previamente, es necesario hallar en las unidades apropiadas algunos de los datos, así como el valor de algunos parámetros:

- Para hallar la densidad relativa se toma $\rho_0 = 999,19 \text{ kg/m}^3$, siendo esta la densidad del agua a 15°C, por lo que $\rho_1/\rho_0 = 1,9015$.
- El caudal es necesario introducirlo en la ecuación 1 en m³/h. Sabiendo la densidad se obtiene $Q=105,26316 \text{ m}^3/\text{h}$.

- De la Tabla 16, se obtiene el valor de $N_1=0,865$

Introduciendo los parámetros en la ecuación 1:

$$C_v = \frac{Q}{N_1} \sqrt{\frac{\rho_1/\rho_0}{\Delta P}} = \frac{105,26316}{0,865} \sqrt{\frac{1,9015}{6}} = 75,043$$

Una vez obtenido el C_v preliminar, se tomará este valor para comenzar el proceso iterativo. Con el valor de F_d calculado previamente, se procede a calcular Re_v . Para ello es necesario adaptar unidades de algunos parámetros y obtener algunos de las tablas:

- Las unidades de viscosidad es necesario adaptarlas de cP a m^2/s .
- Es necesario conocer el valor de N_4 , el cual se toma de la tabla 11: $N_4=7,6 \times 10^{-2}$.

Acorde a la ecuación 8 se obtiene:

$$Re_v = \frac{N_4 F_d Q}{v \sqrt{C_i F_L}} \left(\frac{F_L^2 C_i^2}{N_2 D^4} + 1 \right)^{1/4} = \frac{7,6 \times 10^{-2} \cdot 0,46 \cdot 605,263}{1,838 \times 10^{-6} \sqrt{105,91 \cdot 0,9}} \left(\frac{0,9^2 \cdot 105,91^2}{0,865^2 \cdot 355,6^4} + 1 \right)^{1/4} = 1179181$$

Al ser mayor que 10000 y asumiendo que el tamaño de la tubería coincide con el de la válvula el valor preliminar de C_v es el valor final.

Constrastando el valor calculado manualmente con el hallado mediante un programa específico de cálculo:

The screenshot shows a software interface for valve sizing. The top section contains input fields for ITEM (Línea de sales), TAG (10-PV-001), Fluid Type (Liquid), and Design Pressure (27 bar g). Below this, there are fields for Pipe In and Pipe Out (both 10 inch). The main section is a table of operating conditions with columns for Min, Norm, and Max. The 'Norm' column is highlighted in cyan. Below the table is a summary table of results.

	Min	Norm	Max	Other
flow rate		200000		
inlet pressure		7		
outlet pressure		2		
pressure drop		5		
temperature		290		
vapor pressure		0,004		
critical pressure		1000		
viscosity		3,5		
liquid Gf		1,9015		

flowing cond.	Incipient		
required Cv	75,13		
oversize req Cv	75,13		Cv x 1
Sound Level, IEC	72		dB(A (+5/-5))
% lift			
% Cv			
FL	0,9		
critical FL	0,8454		
33 ft/s dia.	2,393		in
valve velocity	1,953 [0]		ft/s [Inlet [0]outlet
	0		

Vemos que se obtiene un valor de $C_v=75,13$, por lo que se puede dar por validado el cálculo preliminar del C_v de la válvula.

Como se puede comprobar, la metodología manual de cálculo es precisa pero muy trabajosa. Se puede hallar el valor preliminar de Cv con ella. Mediante un programa específico como el de la compañía Masoneilan se pueden agilizar mucho los procesos de dimensionado. A continuación, se detalla el proceso de dimensionado.

En primer lugar, se halla el *rating* en base a las condiciones de presión y temperatura. Para la línea de sales las condiciones de diseño serían las siguientes:

$$P = 27 \text{ bar g}$$

$$T = 370 \text{ }^\circ\text{C}$$

La propia herramienta lleva implementado el cálculo de la clase de presión:

A continuación, se realiza el cálculo preliminar para los tres regímenes de caudal que se van a controlar: mínimo, normal y máximo:

	Min	Norm	Max	Other
flow rate	150000	200000	1500000	
inlet pressure	8	7	5	
outlet pressure	2	3		
pressure drop	6	5	2	
temperature	290	290	290	
vapor pressure	0,004	0,004	0,004	
critical pressure	1000	1000	1000	
viscosity	3,5	3,5	3,5	
liquid Gf	1,9015	1,9015	1,9015	
Velocity				m/s
flowing cond.	Incipient	Incipient	Incipient	
required Cv	51,44	75,13	891	
oversize req Cv	51,44	75,13	891	Cv x 1
Sound Level, IEC	72	72	< 70	dBA (+/-5)
% lift				
% Cv				
FL	0,9	0,9	0,9	
critical FL	0,8662	0,8454	0,6327	
33 m/s dia.	1,144	1,321	3,619	in
valve velocity	0,4464 [O]	0,5952 [O]	4,464 [O]	m/s [Inlet [O]Outlet]
	0	0	0	

Por tanto, ya se tiene un C_v preliminar y un *rating* con el que seleccionar un tipo de válvula. Como se adelantaba al inicio, las válvulas bajo estudio serán tipo globo, debido a las características del proceso además de ser las de uso más extendido. Aclarar el detalle de que la presión crítica, que es la presión dada en el punto crítico, sea 1000 es debido a que la presión crítica de las sales es muy alta y para reflejarlo en el programa de cálculo, se dispone un valor muy grande.

A continuación, se detallan las características del tipo de cuerpo y trim que se va a emplear. Los programas de cálculo, al estar diseñados por una compañía, llevan implementadas válvulas de su catálogo para el dimensionado.

Como se puede apreciar, en esta válvula de sales ha sido necesario reducir el tamaño del cuerpo de 10 a 8” para poder “centrar” la válvula, es decir, situar los porcentajes de apertura acorde a los regímenes de caudal.

The screenshot shows a software interface for valve selection. On the left, there are input fields for TAG (10-PV-001), pipe sizes (10 in), and valve specifications (Type: Globe, Reciprocating; Size: 8 in; Rating: ASME; Body Matl: A216 gr WCC; End Conn: RF Flanges; Trim: Equal Percent Contoured; Seat Matl: 316 St. St. Hard Faced Seat). On the right, there is a table comparing three valve sizes: Min (8 in), Norm (7 in), and Max (5 in). The table includes various parameters like flow rate, inlet/outlet pressure, pressure drop, temperature, vapor pressure, critical pressure, viscosity, and liquid Gf. A red box highlights the 'oversize req Cv' row, showing values 79.64 for Min, 100 for Norm, and 911.8 for Max. Another red box highlights the '% lift' row, showing values 20.64 for Min, 25.67 for Norm, and 71.89 for Max. Below the table, there are fields for 'PED Indeterminate' and 'PED Classification'.

	Min	Norm	Max	Other
flow rate	150000	200000	1500000	
inlet pressure	8	7	5	
outlet pressure	2	3		
pressure drop	6	5	2	
temperature	290	290	290	
vapor pressure	0,004	0,004	0,004	
critical pressure	1000	1000	1000	
viscosity	3,5	3,5	3,5	
liquid Gf	1,9015	1,9015	1,9015	
Velocity				m/s
flowing cond.	see sigma	see sigma	sigma ok	
required Cv	79,64	100	911,8	
oversize req Cv	79,64	100	911,8	Cv x 1
Sound Level, IEC	72	74	72	dB(A (+5/-5))
% lift	20,64	25,67	71,89	
% Cv	5,309	6,667	60,79	
FL	0,5596	0,6354	0,8581	
critical FL	0,8662	0,8454	0,6327	
33 m/s dia.	1,144	1,321	3,619	in
valve velocity	0,6757 [0]	0,901 [0]	6,757 [0]	m/s [Inlet] [Outlet]
	0	0	0	

Como se puede comprobar se obtienen unos porcentajes de carrera comprendidos entre el 10 y el 80% que eran los que la bibliografía recomendaba para una válvula con característica isoporcentual. El valor de *rated Cv* es el que aparecerá finalmente en la hoja de datos de la válvula como C_v especificado.

Ecuaciones de dimensionado para fluidos compresibles

De manera análoga, se definirán las ecuaciones que se emplean para hallar el coeficiente de flujo, los parámetros implicados es las mismas y el diagrama de flujo para realizar el método de cálculo.

Las ecuaciones que permiten el cálculo de C_V son las siguientes:

Turbulento	Non-Choked	Sin accesorios	$C_V = \frac{W}{N_6 Y \sqrt{x P_1 \rho_1}}$	10
			$C_V = \frac{W}{N_8 P_1} \sqrt{\frac{T_1 Z}{x M}}$	11
			$C_V = \frac{Q}{N_9 P_1 Y} \sqrt{\frac{M T_1 Z}{x}}$	12
			$C_V = \frac{Q}{N_7 P_1 Y} \sqrt{\frac{G g T_1 Z}{x}}$	13
		Con accesorios	$C_V = \frac{W}{N_6 Y F_P \sqrt{x P_1 \rho_1}}$	14
			$C_V = \frac{W}{N_8 F_P P_1} \sqrt{\frac{T_1 Z}{x M}}$	15
			$C_V = \frac{Q}{N_9 F_P P_1 Y} \sqrt{\frac{M T_1 Z}{x}}$	16
			$C_V = \frac{Q}{N_7 F_P P_1 Y} \sqrt{\frac{G g T_1 Z}{x}}$	17
	Choked	Sin accesorios	$C_V = \frac{W}{0,667 N_6 \sqrt{F_\gamma x_T P_1 \rho_1}}$	18
			$C_V = \frac{W}{0,667 N_8 P_1} \sqrt{\frac{T_1 Z}{F_\gamma x_T M}}$	19
			$C_V = \frac{Q}{0,667 N_9 P_1} \sqrt{\frac{M T_1 Z}{F_\gamma x_T}}$	20
			$C_V = \frac{Q}{0,667 N_7 P_1} \sqrt{\frac{G g T_1 Z}{F_\gamma x_T}}$	21

			$C_V = \frac{W}{0,667N_6F_P\sqrt{F_\gamma x_T P_1 \rho_1}}$	22
		Con accesorios	$C_V = \frac{W}{0,667N_8F_P P_1} \sqrt{\frac{T_1 Z}{F_\gamma x_{TP} M}}$	23
			$C_V = \frac{Q}{0,667N_9F_P P_1} \sqrt{\frac{M T_1 Z}{F_\gamma x_{TP}}}$	24
			$C_V = \frac{Q}{0,667N_7F_P P_1} \sqrt{\frac{G g T_1 Z}{F_\gamma x_{TP}}}$	25
No turbulento	Sin accesorios		$C_V = \frac{W}{N_{27} F_R} \sqrt{\frac{T_1}{\Delta P (P_1 + P_2) M}}$	26
		$C_V = \frac{W}{N_{22} F_R} \sqrt{\frac{M T_1}{\Delta P (P_1 + P_2)}}$	27	
	Con accesorios	-		

Tabla 18. Ecuaciones de coeficiente de flujo para fluidos compresibles.

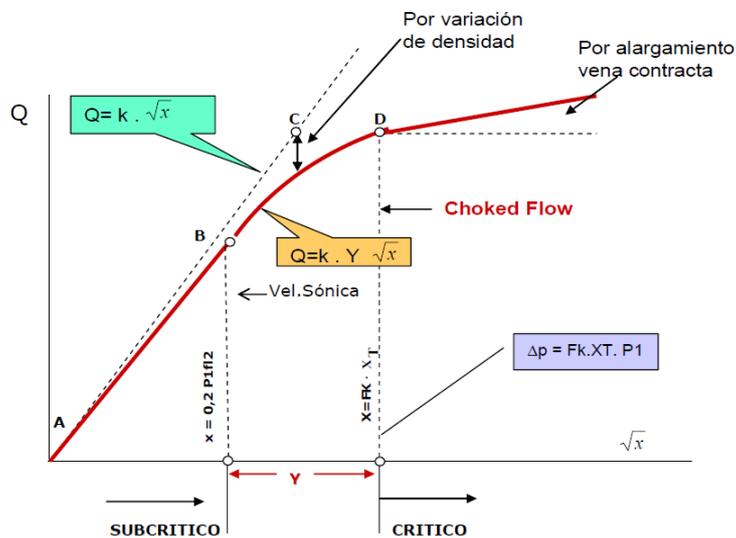
Los parámetros que aparecen en dichas ecuaciones son los siguientes:

- x_T/x_{TP} : factor de presión diferencial (sin/con accesorios)

Se define como x el cociente entre la presión de entrada P_1 y el diferencial de presión.

$$x_T = \frac{\Delta P}{F_\gamma P_1} \quad (28)$$

En el caso de los fluidos compresibles es el parámetro x y no ΔP el que marca el comienzo de la cavitación.



- Y: factor de expansión.

Este factor tiene en cuenta el cambio de densidad de un fluido cuando el fluido pasa de la entrada de la válvula a la vena contracta. Este factor se ve afectado por el área de entrada al cuerpo de la válvula, perfil de la zona del paso de flujo, x, número de Reynolds y calor específico. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$Y = 1 - \frac{x}{3F_{\gamma}x_T} \quad (29)$$

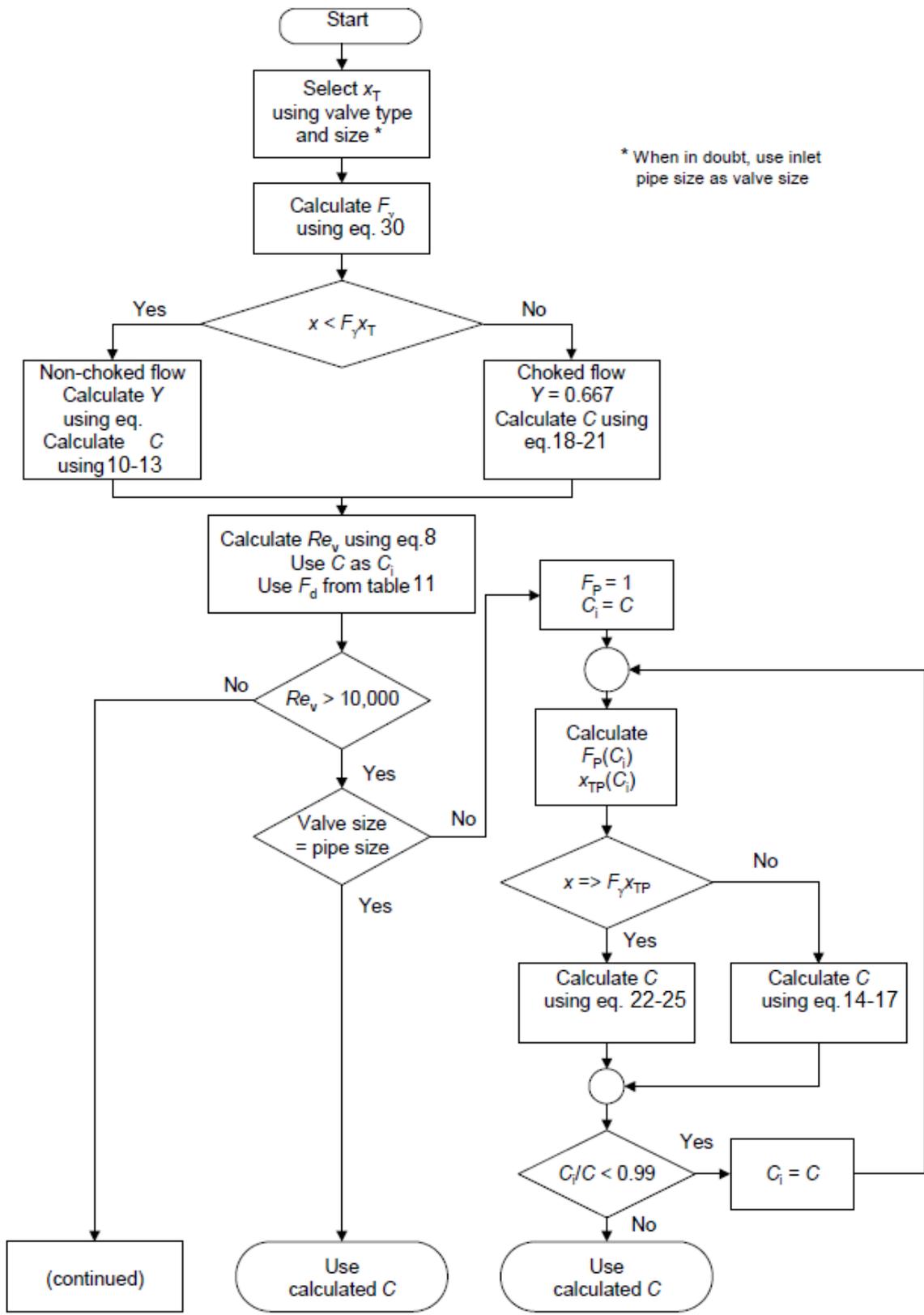
Como se verá en el diagrama de flujo del procedimiento, el valor de x no debe exceder $F_{\gamma}x_T$. De darse esa condición, el valor de Y será de 0,667.

- F_{γ} : factor de calor específico

El valor de x_T en aire a una presión cercana a la atmosférica y con un calor específico de 1,4. Este factor se emplea para corregir x_T .

$$F_{\gamma} = \frac{\gamma}{1,4} \quad (30)$$

Una vez considerados todos los parámetros, se muestra el diagrama de flujo que define los pasos a dar en el cálculo del coeficiente de caudal.



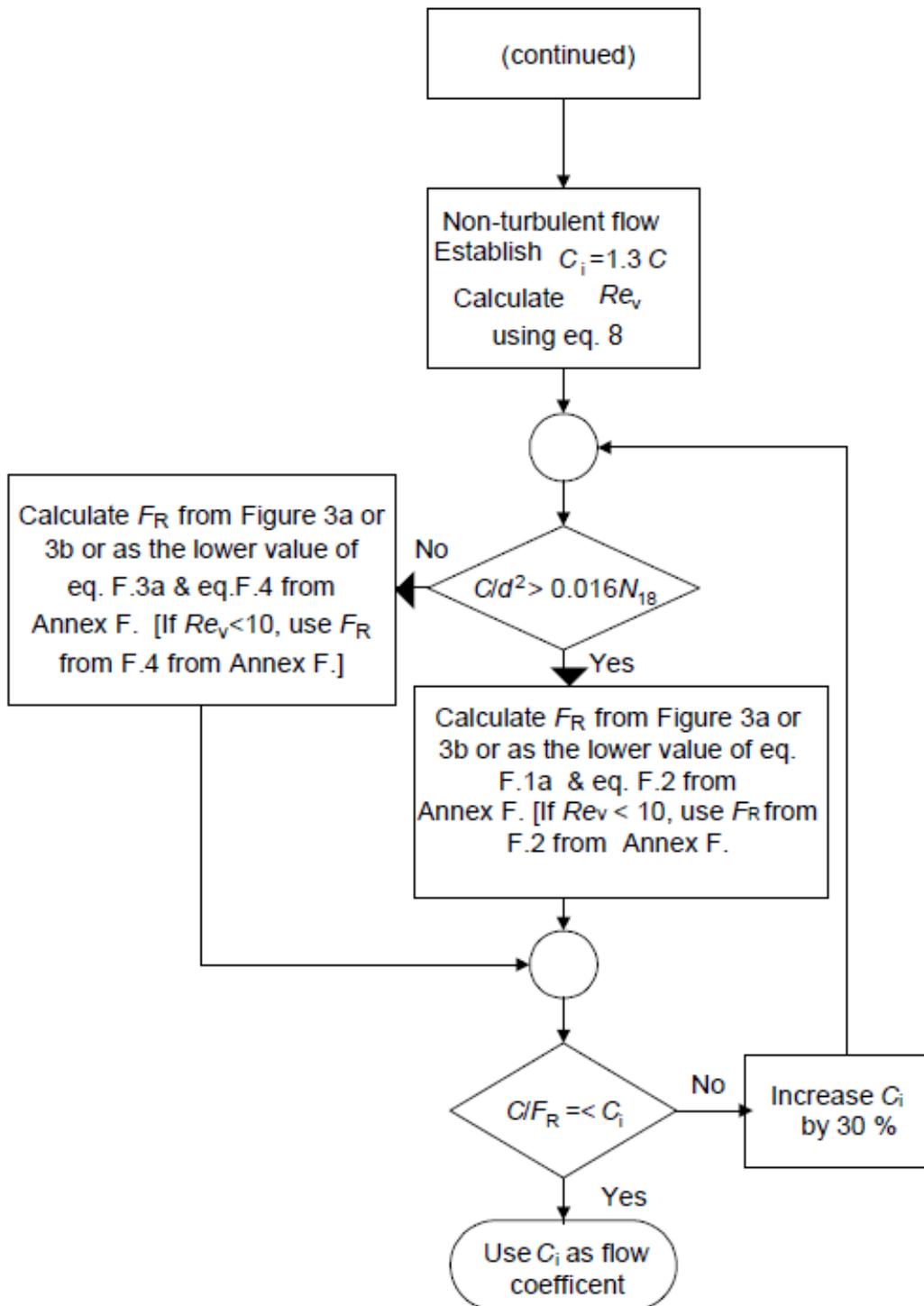


Figura 79. Diagrama de flujo para fluidos compresibles.

- Cálculo de Cv 20-PV-001

De forma más breve se exponen los resultados del dimensionado de la válvula de aire. Al ser el aire un fluido cuyas propiedades están registradas en el programa no es necesario introducir los parámetros como en el caso de las sales fundidas.

ITEM Línea de balanceo 0 TAG 20-PV-001	Fluid Type Gas Standard Fluid Name Air <input type="checkbox"/> override calc fluid properties PED Fluid Group 1 <input checked="" type="checkbox"/> Unstable Fluid																																																																																																												
Pipe In size sch o.d. wall 2 10S 2.375 0.109 Pipe Out 2 10S 2.375 0.109	Calculation Sizing Notes - (Empty) Selection Notes - (Empty) Design Pressure 12,84 bar g Min Design Temperature 25 deg C Max Design Temperature 57 deg C Calc Cv																																																																																																												
Type Globe, Reciprocating Line 41000 Model -41635 Size 2 in 2X2 Matl Group Austenitic Rating ASME CL 150 Body Matl A351 gr CF8M (316 st. st.) End Conn RF Flanges Bonnet Type Standard Bellows Matl Lube Hole Lube Grease Packing PTFE with carbon fiber	<- Cases 1 to 4 Min Norm Max Other Cases 5 to 8 -> <table border="1"> <tr> <td>flow rate</td> <td>300</td> <td>450</td> <td>600</td> <td></td> <td>kg/h</td> </tr> <tr> <td>inlet pressure</td> <td>10,84</td> <td>10,84</td> <td>10,84</td> <td></td> <td>bar a</td> </tr> <tr> <td>outlet pressure</td> <td>0,85</td> <td>0,85</td> <td>0,85</td> <td></td> <td>bar a</td> </tr> <tr> <td>pressure drop</td> <td>9,99</td> <td>9,99</td> <td>9,99</td> <td></td> <td>bar</td> </tr> <tr> <td>temperature</td> <td>25</td> <td>25</td> <td>25</td> <td></td> <td>deg C</td> </tr> <tr> <td>Z</td> <td>0,9953</td> <td>0,9953</td> <td>0,9953</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MW</td> <td>29</td> <td>29</td> <td>29</td> <td></td> <td>MW</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>1,4</td> <td>1,4</td> <td>1,4</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>flowing cond.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>required Cv</td> <td>1,627</td> <td>2,441</td> <td>3,255</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>oversize req Cv</td> <td>1,627</td> <td>2,441</td> <td>3,255</td> <td></td> <td>Cv x 1</td> </tr> <tr> <td>Sound Level, IEC</td> <td>79</td> <td>84</td> <td>87</td> <td></td> <td>dB(A (+5/-5))</td> </tr> <tr> <td>% lift</td> <td>31,52</td> <td>40,29</td> <td>46,28</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>% Cv</td> <td>6,258</td> <td>9,388</td> <td>12,52</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FL</td> <td>0,94</td> <td>0,94</td> <td>0,94</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1/3 sonic dia.</td> <td>1,187</td> <td>1,454</td> <td>1,679</td> <td></td> <td>in</td> </tr> <tr> <td>sonic dia.</td> <td>0,6855</td> <td>0,8396</td> <td>0,9695</td> <td></td> <td>in</td> </tr> <tr> <td>Mach #</td> <td>0,119</td> <td>0,1785</td> <td>0,2379</td> <td></td> <td>Mach # Valve Outlet</td> </tr> </table>	flow rate	300	450	600		kg/h	inlet pressure	10,84	10,84	10,84		bar a	outlet pressure	0,85	0,85	0,85		bar a	pressure drop	9,99	9,99	9,99		bar	temperature	25	25	25		deg C	Z	0,9953	0,9953	0,9953			MW	29	29	29		MW	k	1,4	1,4	1,4			flowing cond.						required Cv	1,627	2,441	3,255			oversize req Cv	1,627	2,441	3,255		Cv x 1	Sound Level, IEC	79	84	87		dB(A (+5/-5))	% lift	31,52	40,29	46,28			% Cv	6,258	9,388	12,52			FL	0,94	0,94	0,94			1/3 sonic dia.	1,187	1,454	1,679		in	sonic dia.	0,6855	0,8396	0,9695		in	Mach #	0,119	0,1785	0,2379		Mach # Valve Outlet
flow rate	300	450	600		kg/h																																																																																																								
inlet pressure	10,84	10,84	10,84		bar a																																																																																																								
outlet pressure	0,85	0,85	0,85		bar a																																																																																																								
pressure drop	9,99	9,99	9,99		bar																																																																																																								
temperature	25	25	25		deg C																																																																																																								
Z	0,9953	0,9953	0,9953																																																																																																										
MW	29	29	29		MW																																																																																																								
k	1,4	1,4	1,4																																																																																																										
flowing cond.																																																																																																													
required Cv	1,627	2,441	3,255																																																																																																										
oversize req Cv	1,627	2,441	3,255		Cv x 1																																																																																																								
Sound Level, IEC	79	84	87		dB(A (+5/-5))																																																																																																								
% lift	31,52	40,29	46,28																																																																																																										
% Cv	6,258	9,388	12,52																																																																																																										
FL	0,94	0,94	0,94																																																																																																										
1/3 sonic dia.	1,187	1,454	1,679		in																																																																																																								
sonic dia.	0,6855	0,8396	0,9695		in																																																																																																								
Mach #	0,119	0,1785	0,2379		Mach # Valve Outlet																																																																																																								
Trim LoDB 1 Stage - Equal % Plug Balanced/PTFE Flow Direct Flow to Oper Leakage IV Seat Ring Quick Change Rated Cv 26 Stem Matl A479 type 316 Plug Matl 316 St. St. HF Seat & Guide Seat Matl 316 St. St. Hard Faced Seat	PED Indeterminate PED Classification : <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>																																																																																																												

Como peculiaridad, señalar la necesidad de especificar un trim antiruido para no superar los valores permitidos de ruido (85 dB).

ANEXO III. VALORES NUMÉRICOS DE PARÁMETROS DEL MODELO

En este anexo se detalla el cálculo de los parámetros descritos en el capítulo 5 donde se describe el lazo de control.

La ecuación deducida para describir el comportamiento del proceso es la siguiente:

$$\left(\frac{2VM\sqrt{P_1 - P_0}}{C R T}\right) \frac{d\Delta P}{dt} - \Delta P = \left(\frac{2\sqrt{P_1 - P}}{C}\right) \Delta F_{out}$$

$$\tau_P \frac{d\Delta P}{dt} - \Delta P = K_P \Delta F_{out}$$

Se detallan los valores de los parámetros utilizados:

$R = 8,205746 \cdot 10^{-5} \frac{m^3 atm}{kg mol}$. Constante de los gases ideales.

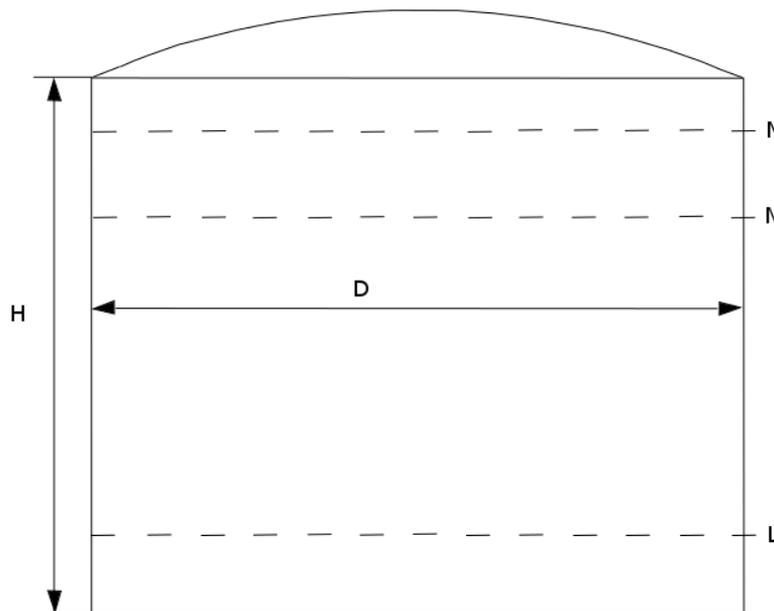
$T = 25 + 273 = 298 K$. Temperatura de operación en K.

$M = 28,96 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}$. Masa molar del aire.

$P_1 = 10,84 atm$. Presión de entrada de la línea de balanceo.

$P_0 = 0,01 atm$. Correspondiente el punto de consigna para actuación del lazo

Volumen del tanque:



Niveles de llenado	Dimensiones
M (alto) = 12 m	D = 50 m
N (normal) = 10 m	R = 25 m
L (mínimo) = 2 m	H = 14 m

Para los cálculos de volumen de aire se considerará el nivel normal de llenado:

$$V_{aire} = V_{total} - V_{sales}$$

$$V_{aire} = \pi R^2 H - \pi R^2 N = \pi 25^2 (14 - 10) = 7853.98 \text{ m}^3 \cong 7854 \text{ m}^3$$

Caudal estrangulado por la válvula (constante C)

$$Q = K_V \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_r}} \frac{m^3}{h}$$

En el anexo II se obtuvo el valor de C_V para la válvula de nuestro lazo. Para el ajuste de unidades se empleará el factor K_V :

$$C_V = 2,441$$

$$K_V = 0,853 \quad C_v = 0,853 \cdot 2,441 = 2,082173$$

Volviendo a la expresión anterior, para emplear caudales máscicos (kg/h), se multiplica por la densidad nuevamente:

$$Q = K_V \rho \sqrt{\frac{1}{\rho_r}} \sqrt{P_1 - P} = C \sqrt{P_1 - P}$$

El valor de C se corresponde con:

$$C = 60 K_V \rho \sqrt{\frac{1}{\rho_r}} = 2,082173 \cdot 0,98 \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{0,98}{1,292}}} = 140,58 \frac{kg}{h \sqrt{atm}}$$

Donde ρ_0 es densidad relativa, tomando como referencia la densidad del aire a 0 °C y 1 atm.

$$\rho_0 = 1,292 \frac{kg}{m^3}$$

Incorporando todos los valores a la primera ecuación:

$$\tau_P = \frac{2VM\sqrt{P_1 - P_0}}{C R T P_0} = \frac{7854 \cdot 28,96 \cdot 10^{-3} \sqrt{10,84 - 0,01}}{2,376 \cdot 8,205746 \cdot 10^{-5} \cdot 298} = 25605 \text{ h}$$

Balance de unidades de la constante de tiempo:

$$\tau_P = \frac{\frac{m^3 \text{ kg}}{\text{mol}} \sqrt{\text{atm}}}{\frac{\text{kg}}{\text{h} \sqrt{\text{atm}}} \frac{\text{atm m}^3}{\text{mol K}} K} = \frac{\frac{m^3 \text{ kg} \sqrt{\text{atm}}}{\text{mol}}}{\frac{\text{kg atm m}^3}{\text{h} \sqrt{\text{atm mol}}}} = \frac{\text{h m}^3 \text{ kg mol atm}}{\text{mol kg m}^3 \text{ atm}} = \text{h}$$

$$K_P = \frac{2\sqrt{P_1 - P}}{C} = \frac{2\sqrt{10,84 - 0,01}}{2,376} = 2,77$$

ANEXO IV. PLANOS
