



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial**

**Rediseño y puesta en marcha de
una instalación experimental para
el estudio del proceso de
condensación de refrigerantes en
tubos multipuerto tras su
traslado.**

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

**Autor: Francisco Javier Delgado
García**
Director: Francisco Vera García
Codirector: Alejandro López Belchí

Cartagena, 5 de Julio de 2016



AGRADECIMIENTOS

He de expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que han formado parte de mi desarrollo personal e intelectual y sin las cuales no habría llegado al punto en el que me encuentro ahora mismo.

Es imposible nombrar a todos, pero si puedo reconocer específicamente a la mayoría de ellos:

Dr. Francisco Vera García y Dr. Alejandro López Belchí, mi director y codirector de proyecto respectivamente, cuya paciencia y dedicación han resultado ser de vital importancia para la realización de este proyecto.

Mis compañeros de titulación con los que he compartido tantas horas de clase, prácticas y nervios antes de los exámenes.

Mi maestro y mis compañeros de artes marciales que me han dado la visión adecuada de la vida.

Mis amigos Alejandro, Ignacio y Jorge cuyos años de amistad han influido de manera importante para formar al tipo de hombre que soy ahora.

Mis amigos, “Los Five”, con los que he compartido una innumerable cantidad de horas en la biblioteca y fuera de ella, que forman parte de mi historia personal.

A mi familia y especialmente a mis abuelos, que me quieren de manera incondicional.

Mi hermana, la persona con la que mejor me entiendo en este mundo y de la que más orgulloso me siento.

Mis padres, sin los cuales nada de esto sería posible, cuyo amor y apoyo incondicional son las bases sobre las que se ha cimentado mi vida.



ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS	11
NOMENCLATURA.....	12
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1. ANTECEDENTES	16
1.2. MOTIVACIÓN.....	16
1.3. OBJETIVOS	16
1.4. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO.....	17
Capítulo 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	19
2.1. INTRODUCCIÓN.....	19
2.2. CONCEPTOS TERMODINÁMICOS.....	19
2.2.1. Estado termodinámico.....	19
2.2.1.1. <i>Principio de estado</i>	20
2.2.1.2. <i>Sistema simple compresible</i>	20
2.2.2. Relación p-v-T.....	21
2.2.2.1. <i>La superficie p-v-T</i>	21
2.2.2.2. <i>Proyecciones de la superficie p-v-T</i>	22
2.2.2.3. <i>Cambio de fase</i>	25
2.3. TECNOLOGÍA DE MINI-CANALES	28
2.3.1. Flujo bifásico.....	30
2.3.2. Patrones de flujo	32
2.4. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR	33
2.5. CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN.....	37
2.5.1. Caída de presión debido a la contracción y expansión.....	38
2.5.1.1. <i>Flujo monofásico</i>	38
2.5.1.2. <i>Flujo bifásico</i>	41
Capítulo 3. SENSORES	46
3.1. TECNOLOGÍA BÁSICA DE SENSORES.....	46
3.2. DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE UN SENSOR	47
3.3. VISIÓN GENERAL DE SENSORES	48
3.4. SENSORES DE CAUDAL	49



3.4.1.	Métodos de medida de caudal.....	50
3.4.1.1.	<i>Medidores de caudal másico.....</i>	<i>50</i>
3.4.1.2.	<i>Medidores electromagnéticos.....</i>	<i>51</i>
3.5.	SENSORES DE PRESIÓN.....	51
3.5.1.	Sensores de presión piezorresistivos	51
3.5.1.1.	<i>Fundamentos de la tecnología de sensores de presión.....</i>	<i>52</i>
3.5.1.2.	<i>Tipos de medida de presión.....</i>	<i>53</i>
3.5.2.	Sensores de presión piezoeléctricos	54
3.5.2.1.	<i>Piezoelectricidad.....</i>	<i>55</i>
3.5.2.2.	<i>Corte longitudinal y transversal, efecto de volumen.....</i>	<i>56</i>
3.5.2.3.	<i>Materiales piezoeléctricos.....</i>	<i>57</i>
3.6.	MEDIDORES DE TEMPERATURA.....	58
3.6.1.	Tipos de sensores y tecnologías	58
3.6.1.1.	<i>Electrónicos</i>	<i>58</i>
3.6.1.2.	<i>Dispositivos resistivos.....</i>	<i>59</i>
3.6.2.	Ventajas y desventajas de cada dispositivo	60
3.6.3.	Resumen.....	64
3.7.	TIPOS DE MEDIDA DE VOLTAJE	65
3.7.1.	Medición de Voltaje por Medio de Referencia a Tierra	66
3.7.2.	Medición de voltaje por medio diferencial.	68
Capítulo 4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN		70
4.1.	INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	70
4.1.1.	Lazo principal.....	71
4.1.2.	Lazo de refrigeración primario	73
4.1.3.	Lazo de refrigeración secundario	73
4.1.4.	Lazo de evaporación.....	74
4.2.	SECCIÓN DE ENSAYO	75
4.3.	SENSORES.....	76
4.3.1.	Caudalímetros	77
4.3.2.	Sensores de presión.	80
4.3.3.	Sensores de temperatura.....	81
4.4.	ACTUADORES Y CONTROLADORES.....	83
4.4.1.	Variadores de frecuencia	83
4.4.2.	Actuadores de control modulante	85



4.4.3.	Controladores PID	85
4.5.	BOMBAS	86
4.6.	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	88
4.6.1.	Conexiones y canales de las tarjetas multiplexoras.....	91
4.6.2.	Conexiones y canales de la tarjeta de adquisición de datos.....	96
4.7.	DETECTORES DE FUGAS Y EXTRACTOR.....	98
4.8.	VÁLVULAS.....	101
4.9.	ENFRIADORA	102
4.10.	CALENTADOR.....	103
4.11.	INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	104
4.12.	CONEXIÓN ELÉCTRICA	105
4.12.1.	Conexión PID	112
4.12.2.	Barreras intrínsecas de seguridad	116
4.12.3.	Fuentes de alimentación	117
4.12.4.	Conexión de seguridad.....	118
4.13.	RESUMEN DEL CAPÍTULO	123
Capítulo 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		125
5.1.	CONCLUSIONES	125
5.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	126
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....		128



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. De izquierda a derecha: Diagrama tridimensional de una sustancia pura que se expande al congelarse y diagrama tridimensional de una sustancia pura que se contrae al congelarse.	21
Figura 2. Diagrama de fases de una sustancia pura.....	23
Figura 3. Diagrama p - v	24
Figura 4. Diagrama T - v	25
Figura 5. Dispositivo cilindro-pistón.	26
Figura 6. Diagrama de fases del agua.	28
Figura 7. Tipos de flujo bifásico.....	33
Figura 8. Sección de ensayo.	33
Figura 9. Nomenclatura utilizada en la caracterización de los procesos de contracción y expansión.	38
Figura 10. Coeficiente de expansión de Kays y London.....	39
Figura 11. Coeficiente de compresión de Kays y London.	40
Figura 12. Medidor de efecto coriolis.....	50
Figura 13. Principio medidor electromagnético.	51
Figura 14. Puente Wheatstone.	53
Figura 15. Chasis NI CompactDAQ y Módulo de Entrada Analógica NI 9205	66
Figura 20. Esquema completo de la instalación.	71
Figura 21. Geometría del tubo de estudio y la camisa exterior.....	76
Figura 22. Esquema de sensores.....	77
Figura 23. De izquierda a derecha: Coriolis Elite CMFS010M, Coriolis Elite CMF025, Micro MotionTransmitter 2700.....	79
Figura 24. De izquierda a derecha: MAG1100Std, Transmitter MAG6000.....	80
Figura 25. Rosemount® 3051.....	80
Figura 26. PT-100.	82
Figura 27. Localización de termopares.	83
Figura 28. Variador de frecuencia VS mini J7.....	84
Figura 29. Actuador AME 30.	85
Figura 30. De izquierda a derecha: Watlow DIN-a-mite®, EZ-ZONE®PM Express.....	86
Figura 31. De izquierda a derecha: Grundfos UP 20-40 N, Roca SB-5Y, Micropump RL71B.....	87
Figura 32. De izquierda a derecha: Agilent 34970A, módulo multiplexor 34901A.	88
Figura 33. De izquierda a derecha: Tarjeta NI-PCI 6229, bus de datos, Cable de conexión.	89



Figura 34. Acondicionador de señal.....	91
Figura 35. Conexión RTD en tarjeta.	92
Figura 36. Conexión de resistencias en tarjeta.....	92
Figura 37. Conexión de RTD a acondicionadores de señal.	96
Figura 38. HoneywellSensepoint XCD.....	99
Figura 39. Sistema de elevación de la instalación.....	99
Figura 40. Sistema de extracción.	100
Figura 41. Válvula serie Tajo 2000.	101
Figura 42. Válvula ESSEN.....	102
Figura 43. Enfriadora Airwell MQL 08 M.....	103
Figura 44. Calentador de resistencia sumergible Watlow.	104
Figura 45. Intercambiador de placas Swep.....	104
Figura 46. Esquema unifilar.	105
Figura 47. Esquema grupos.....	106
Figura 47. Grupo 1.	107
Figura 48. Grupo 2.	109
Figura 49. Grupo 3.	110
Figura 50. Grupo PID.....	111
Figura 51. Grupo 4.	112
Figura 52. Alimentación PIDs.	113
Figura 53. Conexión RTD en los PID.....	113
Figura 54. De izquierda a derecha: Conexión de señal de salida del PID del calentador y conexión de señal de salida de los PID con válvula de 3 vías.....	114
Figura 55. Conexión del Watlow DIN-a-mite®	114
Figura 56. Conexión contactor al PID.....	115
Figura 57. Comunicación entre PIDs.....	115
Figura 58. Adaptador y convertor.....	115
Figura 59. Alimentación en serie.	116
Figura 60. Conexión caudalímetros en barreras.....	116
Figura 61. Conexión sensores de presión en barreras.....	117
Figura 62. De izquierda a derecha: Fuente de alimentación de las barreras intrínsecas, fuente de alimentación del detector de fugas y fuente de alimentación del caudalímetro coriolis del circuito de refrigerante.	117
Figura 63. Fuente de alimentación del caudalímetro coriolis del circuito de refrigeración primario.....	118



Figura 64. Contactor 1.....	119
Figura 65. Conexión contactor 2 con contactor 3.....	119
Figura 66. Conexión PID con contactor 3.....	120
Figura 67. Contactor 1.....	121
Figura 68. Conexión contactor 1 con contactor 3.....	121
Figura 69. Alimentación del contactor 3.....	122
Figura 70. Conexión contactor 3 con transformador.....	122
Figura 71. Esquema conexión de seguridad.	123



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sensores típicos y sus salidas.	49
Tabla 2. Rangos de temperatura de los sensores de medida de temperatura.	65
Tabla 3. Características del tubo.	76
Tabla 4. Especificaciones técnicas de los Coriolis Elite.	78
Tabla 5. Especificaciones Micro Motiontransmitter 2700.	79
Tabla 6. Especificaciones técnicas del caudalímetro electromagnético.	79
Tabla 7. Especificaciones técnicas de los sensores de presión.	80
Tabla 8. Características de las termorresistencias.	82
Tabla 9. Características de los variadores de frecuencia.	84
Tabla 10. Características de actuadores AME.	85
Tabla 11. Características de los PID.	86
Tabla 12. Características bomba Roca SB-5Y.	87
Tabla 13. Características bomba Grundfos UP 20-40 N.	87
Tabla 14. Características bomba Micropump.	87
Tabla 15. Características Agilent 34970A.	88
Tabla 16. Características tarjeta NI-PCI 6229.	90
Tabla 17. Características de los acondicionadores.	91
Tabla 18. Canales tarjeta multiplexora 1.	93
Tabla 19. Canales tarjeta multiplexora 2.	94
Tabla 20. Canales tarjeta multiplexora 3.	95
Tabla 22. Canales placa C-0.	97
Tabla 23. Canales placa C-1.	98
Tabla 24. Características Honeywell Sensepoint XCD.	98
Tabla 25. Características enfriadora Airwell MQL 08 M.	103
Tabla 26. Características calentador eléctrico.	103



NOMENCLATURA

Latinos

A	Área
AC	Corriente alterna
$B_0 = \frac{\Delta\rho g L^2}{\sigma}$	Número de Bond
C	Coeficiente calor específico
C_c	Coeficiente de vena contracta / Coeficiente Chisholm
D, d	Diámetro
DC	Corriente continua
E	Entrainment ratio / Campo eléctrico
f	Factor de fricción
$F_r = \frac{v}{c}$	Número de Froude
g	Aceleración gravitatoria
G	Gasto másico
h	Entalpía específica
L	Longitud
$L.E.L$	Lower explosivelimit
m	Masa
\dot{m}	Flujo másico
p	Presión
p_c	Presión crítica
PID	Proporcional integral derivativo
Q	Calor
\dot{Q}	Flujo de calor



RTD Resistance temperature detector

$R_e = \frac{\rho v L}{\mu}$ Número de Reynolds

SEM Scanning Electron Microscope

T Temperatura

T_c Temperatura crítica

u Velocidad

USB Universal serial bus

v Volumen

\dot{v} Caudal volumétrico

$W_e = \frac{\rho v^2 L}{\sigma}$ Número de Weber

x Título de vapor

Griegos

α Coeficiente de transmisión de calor convectivo

γ Area ratio

ε Fracción de vacío / Constante dieléctrica

μ Viscosidad dinámica

σ Tensión superficial

ρ Densidad

ϕ Multiplicador

Δ Incremento



Superíndices y subíndices

<i>acc</i>	Accesorios
<i>c</i>	Contracción
<i>channel</i>	Canal
<i>e</i>	Expansión
<i>evp</i>	Evaporador
<i>f</i>	Frictional / Líquido saturado
<i>g</i>	Vapor saturado
<i>in</i>	Entrada
<i>l</i>	Líquido
<i>med</i>	Media / Promedio
<i>mom</i>	Momento
<i>out</i>	Salida
<i>ref</i>	Refrigerante
<i>tp</i>	Bifásico
<i>ts</i>	Sección de ensayo
<i>tube</i>	Tubo
<i>w</i>	Agua



Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Hoy en día la incorporación de microcanales y minicanales a la vida cotidiana es una realidad. Es la capacidad de poder crear dispositivos y sistemas a estas escalas lo que ha permitido incorporar este tipo de tecnología a ámbitos como el de refrigeración de aire acondicionado o en el mundo de la automoción. Aunque se sabe que las ventajas de utilizar la microescala para el aumento de transporte son amplias, no se conoce por completo como la geometría miniaturizada afecta a los procesos físicos. En los sistemas de ingeniería resulta necesario entender y cuantificar como el uso de este tipo de conducciones afecta a los patrones de flujo y por tanto a la transferencia de calor y masa, de manera que se puedan desarrollar sistemas maximizando el rendimiento, reduciendo el coste, las dimensiones, necesidades energéticas, emisiones contaminantes etc.

1.2. Motivación

La motivación de este trabajo es precisamente la necesidad de estudio de los procesos físicos que ocurren durante la transferencia de calor y masa en estos sistemas, puesto que se trata de una tecnología emergente con margen de mejora. Para ello es necesario contar con una instalación preparada para dicho estudio, que es la que ocupa este proyecto. En esta instalación en concreto los intercambiadores están formados por tubos de aluminio de una longitud determinada con secciones rectangulares, triangulares y circulares, de diámetros hidráulicos en torno a 1 mm, y adecuada para la investigación del proceso de condensación dentro de los mencionados intercambiadores.

En este proyecto se describe la instalación que se ha desarrollado en la Universidad Politécnica de Cartagena para el estudio de los procesos de condensación de refrigerantes en mini y microcanales, así como las tecnologías ligadas a los sensores utilizados y el procedimiento de cálculo del coeficiente de transferencia y pérdida de presión en el tubo.

1.3. Objetivos

El objeto principal de este documento es la realización del proyecto fin de grado, necesario para la obtención del Grado en Ingeniería Mecánica.

Con este motivo se propone el siguiente proyecto de rediseño y puesta en marcha de una instalación experimental para el estudio de los procesos de condensación en tubos multipuerto de minicanales.



Los objetivos específicos del presente trabajo son los siguientes:

- Conocer, clasificar y manejar los distintos tipos de sensores de la instalación.
- Identificación de los distintos componentes, maquinaria y elementos fundamentales de los que consta normalmente este tipo de instalaciones industriales.
- Conocer las distintas tecnologías de las que disponen los elementos de obtención y almacenamiento de datos.
- Adecuada documentación de los distintos elementos y sensores de los que consta la instalación.
- Planificar, organizar y coordinar el adecuado montaje de la instalación.
- Descripción y puesta a punto de la instalación para futuros ensayos.
- Supervisar y comprobar que se cumplen los requisitos establecidos en la norma para que la instalación esté dotada del equipamiento y ambiente necesario para el trabajo en atmósferas explosivas (normativa ATEX).

1.4. Organización del proyecto

Este proyecto se ha estructurado en 4 capítulos, incluyendo este primero de introducción y objetivos.

En el capítulo 2 se presentan los conocimientos teóricos referentes a los intercambios de calor, los procesos termodinámicos, la tecnología de minicanales, las propiedades de flujos bifásicos y el cálculo de los coeficientes de transmisión de calor y pérdida de presión. Todos estos conocimientos resultan necesarios para la total comprensión de los procesos que se realizarían durante el uso de la instalación.

En el capítulo 3 se presentan los conceptos básicos que rigen la tecnología de sensores que van a ser utilizados en la instalación, sus principios de funcionamiento y su adecuación a las variables que van a medir.

En el capítulo 4 se describe al completo la instalación experimental objeto de este proyecto, recorriendo los distintos lazos que van a seguir los fluidos, los sensores incluidos en cada lazo y su objetivo, el funcionamiento de cada elemento, así como su conexión eléctrica y cableado de sensores, además de explicar las razones que residen detrás de cada decisión.

En el capítulo 5 se hace un resumen de lo abarcado por este proyecto, las conclusiones obtenidas y los futuros trabajos que ello implica.



Capítulo 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Introducción

Este capítulo está centrado en establecer los conocimientos teóricos necesarios para comprender los procesos que ocurrirán en la instalación de estudio. Se divide en dos partes claramente diferenciadas. La primera se centra en explicar la base termodinámica teórica que está presente en todos los circuitos, explicando por tanto conceptos de estados termodinámicos, cambio de fase, relación de propiedades termodinámicas etc. La segunda parte se centra en la sección de ensayo, es decir, en la tecnología de los mini-canales, en las propiedades del flujo bifásico y los tipos de flujo bifásico que pueden existir en este tipo de procesos.

2.2. Conceptos termodinámicos.

2.2.1. Estado termodinámico.

El estado termodinámico de un sistema cerrado en equilibrio queda definido como tal mediante los valores de sus propiedades termodinámicas. De la observación de muchos sistemas termodinámicos se deduce que no todas sus propiedades son independientes unas de otras, y que su estado puede determinarse de manera unívoca mediante los valores de sus propiedades independientes. Los valores para el resto de las propiedades termodinámicas se determinan a partir de este subconjunto independiente. Se ha desarrollado una regla general conocida como principio de estado que permitirá determinar el número de propiedades independientes necesarias para especificar el estado de un sistema. Se va a introducir el principio de estado para sistemas de masa y composición conocidas cuando se desprecian las influencias del movimiento de sistemas como un todo y las del campo gravitatorio terrestre.

Para la mayor parte de las aplicaciones consideradas en este apartado interesa lo que dice el principio de estado sobre el estado intensivo de los sistemas. Son de particular interés los sistemas de sustancias puras utilizados con frecuencia, tales como agua o mezclas uniformes de gases no reactivos. Estos sistemas se clasifican como sistemas simples compresibles. Para sistemas simples compresibles de sustancias puras, el principio de estado indica que el número de propiedades intensivas independientes es dos. Se excluyen de las consideraciones presentes las propiedades intensivas tales como la velocidad y la altura a las que se asignan valores relacionados con los datos exteriores del sistema.



2.2.1.1. Principio de estado

Existe una propiedad independiente por cada una de las formas en que la energía de un sistema puede cambiarse independientemente. La energía de un sistema cerrado puede alterarse independientemente por trabajo o calor. Según esto, se puede asociar una propiedad independiente con la transferencia de calor como una forma de variar la energía, y puede contabilizarse otra propiedad independiente por cada forma relevante de transferencia de energía mediante trabajo. Apoyándose en la evidencia experimental, por lo tanto, el principio de estado establece que el número de propiedades independientes para sistemas sometidas a las limitaciones establecidas antes, es uno más que el número de interacciones relevantes de trabajo. Este es el principio de estado.

La experiencia también indica que, a la hora de contar el número de interacciones relevantes de trabajo, basta considerar sólo aquellas que pueden presentarse cuando el sistema recorre un proceso cuasiestático.

2.2.1.2. Sistema simple compresible

El término sistema simple se aplica cuando sólo hay un modo por el que la energía del sistema puede alterarse significativamente mediante trabajo cuando el sistema describe un proceso cuasiestático. Por tanto, contabilizando una propiedad independiente para la transferencia de calor y otra para el modo simple de trabajo se obtiene un total de dos propiedades independientes necesarias para fijar el estado termodinámico de un sistema simple. Este es el principio de estado para los sistemas simples. Aunque no hay ningún sistema que sea realmente simple, muchos pueden modelarse como sistemas simples desde el punto de vista termodinámico. El más importante de estos modelos para las aplicaciones consideradas en este estudio es el sistema simple compresible.

Como sugiere su nombre, las variaciones de volumen pueden tener una influencia significativa en la energía de un sistema simple compresible. El único modo de transferencia de energía mediante trabajo que puede aparecer cuando este tipo de sistemas recorre un proceso cuasiestático está asociado con el cambio de volumen y viene dado por:

$$\int p dV \tag{2.1}$$

Cuando la influencia del campo gravitatorio terrestre se considera despreciable, la presión es uniforme a lo largo de todo el sistema. El modelo de sistema simple compresible puede parecer altamente restrictivo; sin embargo, la experiencia demuestra que es útil para una amplia gama de aplicaciones de ingeniería, aun cuando los efectos eléctricos, magnéticos, de tensión superficial y otros se presenten en alguna medida.

2.2.2. Relación p-v-T

Se va a analizar las propiedades de los sistemas simples compresibles constituidos por sustancias puras (una sustancia pura es la que tiene una composición química uniforme e invariable) y la relación entre dichas propiedades, comenzando por la presión, el volumen específico y la temperatura. La experiencia muestra que la temperatura y el volumen específico pueden considerarse independientes y la presión determinarse como una función de ambas: $p = p(T, v)$. La gráfica de una función tal es una superficie, la superficie $p-v-T$.

2.2.2.1. La superficie p-v-T

En el diagrama de la izquierda de la figura 1 se puede apreciar la superficie $p-v-T$ de una sustancia tal como el agua que se expande al congelarse, es decir, que aumenta su volumen, por otro lado, el diagrama de la derecha corresponde a una sustancia que se contrae al congelarse, característica que se da en la mayor parte de las sustancias. Las coordenadas de un punto de la superficie $p-v-T$ representan los valores que tendrían la presión, el volumen específico, y la temperatura cuando la sustancia estuviera en equilibrio.

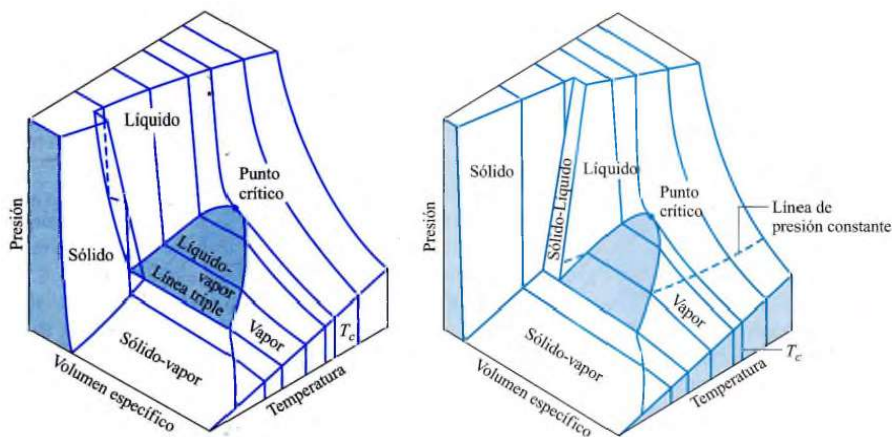


Figura 1. De izquierda a derecha: Diagrama tridimensional de una sustancia pura que se expande al congelarse y diagrama tridimensional de una sustancia pura que se contrae al congelarse.



Como se puede apreciar en las figuras hay determinadas zonas en las que sólo hay una fase: sólido, líquido o vapor. En estas regiones de una sola fase el estado queda definido por dos cualesquiera de las propiedades de presión, volumen específico y temperatura, puesto que todas éstas son independientes cuando sólo hay una fase presente. Localizadas entre las regiones monofásicas hay regiones bifásicas donde se presentan dos fases en equilibrio: líquido-vapor, sólido-líquido y sólido-vapor. Las dos fases pueden coexistir durante cambios de fase tales como vaporización, fusión y sublimación. Dentro de las regiones bifásicas la presión y la temperatura no son independientes; una no puede cambiar sin cambiar la otra también. En estas regiones el estado no puede fijarse por la temperatura y la presión; en cambio queda fijado con el volumen específico y la presión o la temperatura. Tres fases pueden existir en equilibrio sólo a lo largo de la línea denominada línea triple.

Un estado en el que empieza o termina un cambio de fase se denomina estado saturado. La región con forma de domo compuesta de estados bifásicos líquido-vapor recibe el nombre de domo de vapor. Las líneas que bordean el domo de vapor se llaman líneas de líquido saturado y de vapor saturado. En el extremo del domo, donde se unen las líneas de líquido saturado y vapor saturado, está el punto crítico. La temperatura crítica T_c de una sustancia pura es la temperatura máxima en la que pueden coexistir las fases de líquido y vapor en equilibrio. La presión del punto crítico se llama presión crítica, p_c . El volumen específico en este estado es el volumen específico crítico.

La superficie tridimensional $p-v-T$ es útil para destacar las relaciones generales entre las fases de la sustancia pura en estudio. Sin embargo, a la hora de trabajar, es mejor que se utilicen proyecciones bidimensionales de la superficie.

2.2.2.2. Proyecciones de la superficie $p-v-T$

Diagrama de fases

Si la superficie $p-v-T$ se proyecta sobre el plano de presión-temperatura, resulta un diagrama de propiedades conocido como diagrama de fases. Cuando la superficie se proyecta de este modo, las regiones bifásicas se reducen a líneas, como se puede ver en la figura 2 (proyección del diagrama izquierdo de la figura 1). Un punto cualquiera de estas líneas representa todas las mezclas bifásicas a la temperatura y presión correspondientes a ese punto.

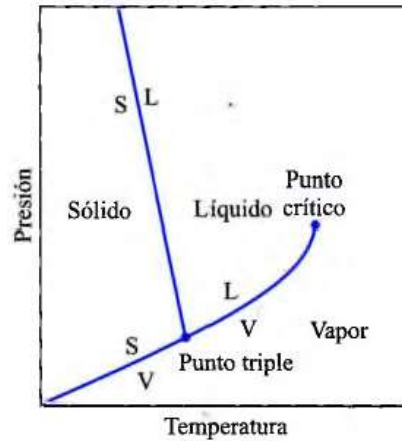


Figura 2. Diagrama de fases de una sustancia pura.

El término de temperatura de saturación designa la temperatura a la que el cambio de fase tiene lugar para una presión determinada, llamada presión de saturación a dicha temperatura. Para cada presión de saturación hay una única temperatura de saturación, y viceversa.

La línea triple de la superficie tridimensional $p-v-T$ se proyecta en un punto sobre el diagrama de fases. Ese punto se llama punto triple. El punto triple del agua se utiliza como referencia a la hora de definir las escalas de temperaturas. Por convenio, la temperatura asignada al punto triple del agua es 273,16 K. La presión medida en el punto triple del agua es 0,6113 kPa.

La línea que representa la región bifásica sólido-líquido sobre el diagrama de fases se inclina a la izquierda para sustancias que se expanden al congelarse y a la derecha para aquellas que se contraen.

Diagrama $p-v$

Al proyectar la superficie $p-v-T$ sobre el plano presión-volumen específico se obtiene el diagrama $p-v$, que se puede apreciar en la figura 3 (Proyección del diagrama de la izquierda de la figura 1). Este diagrama resulta muy conveniente a la hora de resolver problemas.

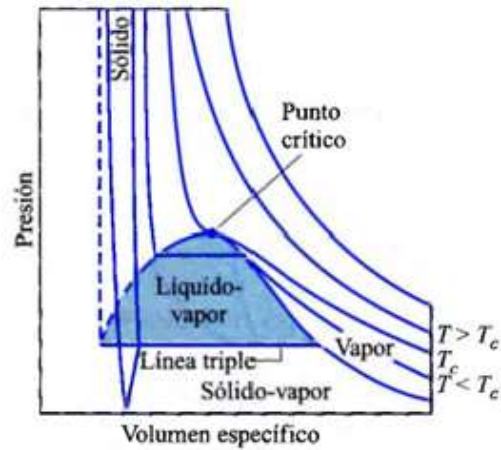


Figura 3. Diagrama p - v .

Inspeccionando el diagrama se puede observar que para cualquier temperatura menor que la temperatura crítica la presión permanece constante mientras atraviesa la región bifásica líquido-vapor, pero en las regiones de fase líquida o fase vapor la presión disminuye para una temperatura dada cuando el volumen específico aumenta. Para temperaturas mayores que, o iguales a la temperatura crítica, la presión disminuye continuamente para una temperatura dada cuando aumenta el volumen específico. En este caso no se atraviesa la región bifásica líquido-vapor. La isoterma crítica presenta un punto de inflexión en el punto triple y su pendiente aquí es cero.

Diagrama T - v

Al proyectar las regiones de líquido, bifásica líquido-vapor y de vapor de la superficie p - v - T sobre el plano temperatura-volumen específico se obtiene el diagrama T - v representado en la figura 4. El comportamiento de todas las sustancias puras presenta características similares en el comportamiento p - v - T , por lo que el diagrama T - v del agua se puede considerar representativo de todas ellas.

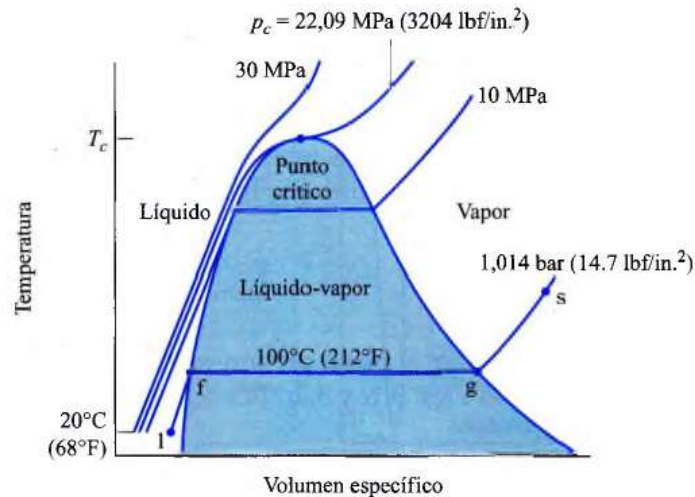


Figura 4. Diagrama T-v.

Al igual que el diagrama p - v , este resulta muy visual y conveniente a la hora de realizar cálculos y resolver problemas. Para presiones menores que la presión crítica la temperatura permanece constante con la presión al atravesar la región bifásica. En las regiones monofásicas de líquido y vapor la temperatura aumenta para una presión dada cuando el volumen específico aumenta. Para presiones mayores o iguales que la presión crítica, la temperatura aumenta continuamente para una presión dada cuando el volumen específico también aumenta. En estos casos no se atraviesa la región bifásica líquido-vapor.

2.2.2.3. Cambio de fase

Es interesante estudiar los fenómenos que se presentan cuando una sustancia pura sufre un cambio de fase. Como ejemplo consideraremos el caso de un sistema cerrado con 1 kg de masa de agua líquida a 20 °C contenido en un dispositivo cilindro-pistón, representado en la figura 5. Este estado se representa por el punto 1 de la figura 4. Supongamos que el agua se calienta lentamente manteniendo su presión constante y uniforme en todo el sistema a 1,014 bar.



Figura 5. Dispositivo cilindro-pistón.

Fase líquida

Cuando el sistema se calienta a presión constante, la temperatura aumenta considerablemente mientras que el volumen específico aumenta ligeramente. En un momento dado el sistema alcanza un estado representado por el punto f de la figura 4. Este estado es el de líquido saturado correspondiente a la presión especificada. Los estados líquidos a lo largo de la línea l-f de la figura 4 reciben el nombre de estados subenfriados porque la temperatura en estos estados es menor que la temperatura de saturación para la presión dada. Estos estados también se definen como estados de líquido comprimido porque la presión en cada estado es mayor que la presión de saturación correspondiente a la temperatura del estado.

Sistemas bifásicos

Cuando el sistema está en el estado líquido saturado, el suministro de un flujo de calor adicional, a presión constante, da lugar a la formación de vapor sin cambios en la temperatura, pero con un aumento considerable en el volumen específico. Como se ve en la segunda imagen de la figura 5 el sistema consiste ahora en una mezcla bifásica líquido-vapor.

Cuando una mezcla líquido-vapor existe en equilibrio, la fase líquida es líquido saturado y la fase vapor es vapor saturado. Si el sistema se sigue calentando hasta que la última porción de líquido se haya vaporizado, se alcanza el punto g de la figura 4, que es el estado de vapor saturado. Las diferentes mezclas bifásicas líquido-vapor que se dan en el proceso pueden distinguirse una de otra por su título, x , que es una propiedad intensiva.

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{líquido} + m_{vapor}} \quad (2.2)$$



El valor del título va de 0 a 1: los estados de líquido saturado tienen $x = 0$ y los de vapor saturado corresponden a $x = 1$. Aunque se define como un cociente, el título se da frecuentemente como un porcentaje.

Fase de vapor

Cuando el sistema está en el estado de vapor saturado, un calentamiento adicional, a la presión dada, da lugar a un aumento tanto en la temperatura como en volumen específico. El estado s de la figura 4 es representativo de los estados que se alcanzarían por dicho calentamiento adicional a presión constante. Un estado como el s recibe frecuentemente el nombre de vapor sobrecalentado porque el sistema se encuentra a una temperatura mayor que la temperatura de saturación correspondiente a la presión dada.

Considérese ahora el mismo experimento ideal para las otras presiones constantes mostradas en la figura 4, 10 Mpa, 22,09 MPa y 30 Mpa. La primera de estas presiones es inferior a la presión crítica del agua, la segunda es la presión crítica y la tercera es mayor que la presión crítica. Como antes, sea el estado inicial el de líquido a 20 °C. Primero se estudia el sistema calentándolo lentamente a 10 Mpa. A esta presión, el vapor se formará a una temperatura más alta que la del ejemplo anterior, porque la presión de saturación mayor. Por otra parte, se producirá un incremento menor en el volumen específico desde líquido saturado a vapor, como consecuencia del estrechamiento del domo de vapor. Fuera de esto, el comportamiento general será el del ejemplo anterior. Consideremos ahora el comportamiento del sistema cuando se calienta a la presión crítica. Como se puede ver siguiendo la isobara crítica no hay cambio de fase de líquido a vapor. En todos los casos existe una única fase. La vaporización (y el proceso inverso de condensación) se presentan sólo cuando la presión es menor que la presión crítica. Así, en los estados donde la presión es mayor que la presión crítica, los términos líquido y vapor tienden a perder su significado.

Fusión y sublimación

Para estudiar las transiciones de sólido a líquido (fusión) y de sólido a gas (sublimación) se considera un sistema consistente en una masa de hielo a una temperatura por debajo de la temperatura del punto triple. En el caso en el que sistema se encuentra en el estado a de la figura 6, donde la presión es mayor que la presión del punto triple.

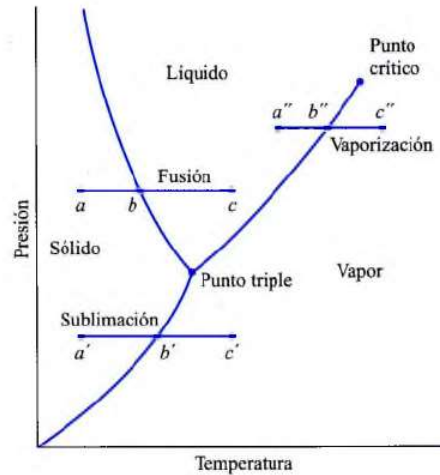


Figura 6. Diagrama de fases del agua.

El sistema se calienta lentamente manteniendo su presión constante y uniforme en todo él. La temperatura aumenta con el calentamiento hasta que se alcanza el punto b. En este estado el hielo es un sólido saturado. Si se continúa suministrando calor a presión constante se produce la formación de líquido sin cambios en la temperatura. Siguiendo con el proceso de calentamiento, el hielo continúa fundiendo hasta que en un momento dado se produce la fusión completa y el sistema sólo contiene líquido saturado. Durante el proceso de fusión la temperatura y la presión permanecen constantes. Para la mayor parte de las sustancias el volumen específico del líquido aumenta durante la fusión, pero para el agua el volumen específico del líquido es menor que el volumen específico del sólido. El proceso de sublimación es similar, representado en la figura 6 por la línea $a'-b'-c'$. [1]

2.3. Tecnología de Mini-Canales

Los mini-canales pueden ser descritos como tubos con uno o más puertos extruidos en aluminio. Se categorizan como mini-canales cuando su diámetro hidráulico está en el rango de los 0,2 a los 3 mm. Su uso en sistemas de refrigeración es una realidad desde hace algunos años gracias a la habilidad humana de fabricar sistemas en micro-escala. Algunas empresas de intercambiadores de calor tienen sus propios modelos especialmente desarrollados para su uso en el sector automovilístico, sector de refrigeración y la refrigeración industrial.



Se pueden obtener muchos beneficios usando este tipo de tecnología. En la mayoría de los casos este tipo de intercambiadores de calor se han estado usando sin un amplio conocimiento de cómo la geometría reducida afecta a los procesos físicos. El aumento de los procesos de transporte debidos a la dimensión micro-escala tiene una gran cantidad de beneficios y es ampliamente utilizada en los sistemas biológicos. Las principales ventajas de estos tubos es la mayor eficiencia calorífica; son más compactos y de menor peso comparados con tubos de aletas de intercambiadores de calor con la misma capacidad térmica.

En los sistemas de ingeniería el objetivo principal es entender y cuantificar cómo el uso de esta tecnología afecta a los patrones de flujo, así como al coeficiente de transmisión de calor y la transferencia de masa. De esta manera la eficiencia se maximiza y los requerimientos de coste, tamaño y energía se minimizan.

Los fenómenos de evaporación y condensación en el interior de los mini-canales tienen una gran cantidad de aplicaciones: en disipadores de calor o de energía electrónica, en control de temperatura en la industria aeroespacial, sistemas de refrigeración o de inyección de combustible, componentes de evaporación en células de combustible, refrigerar las secciones en contacto con el plasma en los reactores de fusión, unidades de condensación en sistemas de aire acondicionado en automóviles, etcétera.

El objetivo de utilizar mini-canales en intercambiadores de calor compactos en sistemas de aire acondicionado y de refrigeración es reducir la carga de refrigerante. Esta reducción de carga de refrigerante potencia el uso de refrigerantes naturales y contribuye a la fabricación de sistemas más eficientes y ecológicos.

El uso de estos aparatos en sistemas de aire acondicionado y refrigeración se ha ido potenciando en los últimos años para adecuarse de mejor manera a los nuevos estándares de eficiencia energética. La mezcla de refrigerantes y el uso de superficie adicional para la transmisión de calor son medidas que han sido potenciadas como alternativas al uso de hidrofluorocarbonos que son gases de efecto invernadero y además reducen la capa de ozono. De hecho, ya es una realidad la incorporación de esta tecnología a los sistemas de aire acondicionado domésticos con el objetivo de fabricar equipos más compactos, baratos y eficientes energéticamente. [2]



2.3.1. Flujo bifásico

Los procesos de transferencia de momento y calor están fuertemente afectados por los patrones de flujo así que cualquier predicción de coeficiente de transmisión de calor con un flujo de dos fases debe estar basado en patrones de flujo para ese tamaño. Los patrones de flujo afectan fuertemente las leyes del flujo y de la transferencia de calor. Además, el correcto diseño de intercambiadores de calor con mini-canales debe estar basado en métodos de cálculo de probada eficacia para el coeficiente de transmisión de calor y la caída de presión. Estos dos parámetros se ven afectados por los efectos de la gravedad, las fuerzas inerciales, la viscosidad, y la tensión superficial todos ellos se ven afectados por la reducción de tamaño. Por lo tanto, es peligroso extrapolar métodos de cálculo de macro-canales al estudio de mini-canales sin modelos validados experimentalmente.

Los estudios sobre el coeficiente de transferencia de calor y la caída de presión muestran que la validación de las correlaciones está íntimamente unida al diámetro del tubo y a la velocidad másica. Como se ha dicho anteriormente, se debe prestar una especial atención las estructuras de los patrones de flujo en estos tubos.

La principal razón por la que tubos normales deben ser distinguidos de los mini-canales es por las grandes diferencias entre las fuerzas fluidas que tienen en cuenta los números adimensionales de Bond, Webber, Froude y Reynolds.

El tamaño del canal en comparación al tamaño de burbuja se puede expresar mediante los términos del número de Bond. El número de Bond relaciona la importancia de las fuerzas volumétricas (casi siempre fuerzas gravitacionales) con las fuerzas de tensión superficial.

$$B_0 = \frac{\Delta\rho g L^2}{\sigma} \quad (2.2)$$

Un valor alto del número de Bond muestra que los efectos de tensión superficial son despreciables. Un valor pequeño de este número muestra que los efectos de la tensión superficial predominan.

El número de Webber se usa habitualmente para analizar flujos con una interfase entre dos fluidos distintos, especialmente con flujos multifase o con superficies altamente curvadas.

$$W_e = \frac{\rho v^2 L}{\sigma} \quad (2.3)$$



Puede ser considerado como una medida de la importancia relativa de las fuerzas inerciales frente a las fuerzas de tensión superficial.

El número de Froude es definido como la relación entre una velocidad característica frente a la velocidad de las ondas gravitacionales. Otra definición podría ser la proporción entre la inercia y las fuerzas gravitacionales.

$$F_r = \frac{v}{c} \quad (2.4)$$

El número de Reynolds da una proporción entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Este número cuantifica la importancia relativa de estas fuerzas para unas condiciones de flujo determinadas.

$$R_e = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2.5)$$

Este número adimensional tiene un rol muy importante a la hora de caracterizar tipos de flujo, como laminar o turbulento. Flujos laminares presentan un número de Reynolds con prevalencia de fuerzas viscosas. Por otro lado, los flujos turbulentos tienen lugar con números de Reynolds elevados y con prevalencia de las fuerzas inerciales.

En tubos de poco diámetro, más pequeños que 3 mm, la superficie de vapor y la tensión cortante dominan el patrón de flujo. Incluso siendo el gasto másico y el título de vapor los factores que afectan principalmente al patrón de flujo, las propiedades termofísicas del fluido y el diámetro del tubo presentan un rol secundario. Su rol es mucho más importante con gastos másicos intermedios, 150 a 300 kg m⁻² s⁻¹, cuando el gasto másico no es lo suficientemente alto o bajo para que un régimen prevalezca sobre otro. Las propiedades del fluido que más influyen son: densidad de líquido y vapor, viscosidad y tensión superficial. Muchas de las variaciones de las propiedades de los fluidos están relacionadas con la presión reducida.

El diámetro del tubo también afecta a las transiciones entre patrones de flujo. A medida que se reduce el diámetro del tubo, con un gasto másico constante, el flujo evoluciona desde anular a ondulado-anular y desde ondulado-anular a flujo ondulado, se va desplazando hacia valores de título de vapor más pequeños. Con gastos másicos altos, la mayor parte del rango del título de vapor está conectado con el flujo anular y los efectos del diámetro son menos pronunciados.



En este estudio, los intercambiadores de calor están hechos de tubos de aluminio que pueden tener distintas geometrías de sección como triangulares, rectangulares y circulares y diámetros hidráulicos 1mm. [2]

2.3.2. Patrones de flujo

El flujo monofásico en mini-canales está limitado debido al pequeño aumento de temperatura que puede experimentar. Un flujo bifásico es mucho más interesante debido al aprovechamiento del calor latente (cambio de fase). Por lo tanto, con el flujo bifásico se alcanzan mayores coeficientes de intercambio de calor, así como valores más grandes de caída de presión.

En el flujo bifásico líquido-gas las dos fases pueden adoptar una gran cantidad de configuraciones: estas configuraciones se conocen como patrones de flujo o regímenes de flujo. Los parámetros físicos más importantes para determinar los patrones de flujo son:

- Tensión superficial, que mantiene las paredes del canal siempre húmedas (a menos que se calienten cuando normalmente son húmedas) y que favorece la forma esférica de las pequeñas gotas de agua y las burbujas de gas.
- La gravedad, que tiende a empujar la fase líquida hacia la parte inferior del canal (en canales no verticales).

Los patrones de flujo más comunes para tubos de sección circular son los siguientes, ordenados según el incremento del título de vapor. La representación visual se puede apreciar en la figura 7:

- Flujo burbujeante (Bubblyflow): Las burbujas de gas tienden a fluir a lo largo de la parte superior del tubo.
- Flujo de pistón (Plug flow): Las burbujas de gas pequeñas se han fusionado para formar burbujas más grandes de forma más o menos parabólica.
- Flujo estratificado (Stratifiedflow): En el cual la fase líquida y gas están claramente separadas con una interfase plana. Se debe notar que este tipo de flujo es extremadamente raro de encontrar, la interfase en prácticamente todos los casos alcanza una forma de onda.
- Flujo ondulado (Wavyflow): La amplitud de la onda aumenta a medida que la velocidad del gas aumenta.

- Flujo tipo lingote (Slugflow): La amplitud de onda es tan grande que la onda toca la parte superior del tubo.
- Flujo anular (Annularflow): La fase líquida viaja en parte como una película anular pegada alrededor de las paredes del tubo y en parte como pequeñas gotas distribuidas en el gas que fluye en el centro del tubo. [3]

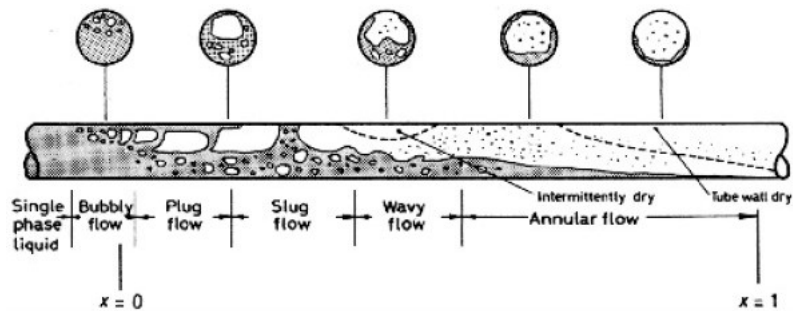


Figura 7. Tipos de flujo bifásico. [3]

2.4. Cálculo del coeficiente de transmisión de calor

Es adecuado establecer el modelo teórico que se va a utilizar para realizar el cálculo de los parámetros característicos de los procesos ocurridos en la sección de ensayo. La descripción de la instalación, así como la posición de los sensores y los datos que obtiene cada uno se explican en el capítulo 4 detalladamente, por lo que en esta parte y en la siguiente la atención se centrará únicamente en explicar el modelo teórico.

Para condensar, el refrigerante en la sección de ensayo, cede una cantidad de calor, Q_{ref} , al agua que circula por la parte interior de la camisa que recubre dicha sección. En la figura 8 se puede ver una representación de esta disposición. Por lo tanto, se puede determinar esa cantidad de calor considerando la variación de temperatura que sufre el agua de la camisa.

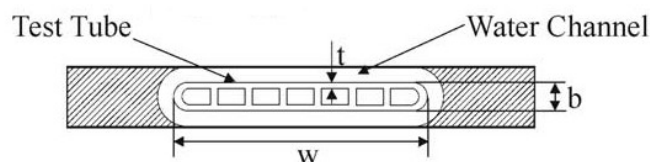


Figura 8. Sección de ensayo. [6]

De esta manera, al conocer la superficie de transferencia y las temperaturas de entrada y salida del refrigerante y del agua se puede determinar el coeficiente global de transmisión de calor HTC como:



$$HTC = \frac{Q_{ref}}{A_0 \Delta T_{lm}} \quad (2.6)$$

El coeficiente de transferencia interior, h_i , se determina mediante la siguiente ecuación:

$$h_i = \left[\left(\frac{1}{HTC} - \frac{1}{h_0} \right) \frac{A_i}{A_0} - \frac{tA_i}{kA_m} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

Siendo h_0 el coeficiente de transmisión de calor en la zona anular, A_m el área en el plano medio de la pared del tubo, A_i el área de intercambio interior en el lado del refrigerante y A_0 el área exterior.

El coeficiente de transmisión de calor convectivo obtenido en el lado del refrigerante es local y se supone calculado para un título de vapor medio entre el valor de entrada y salida de la sección de ensayo, de manera que:

$$x_{med} = \frac{x_{in} + x_{out}}{2} \quad (2.8)$$

Para obtener el título de vapor a la entrada de la sección de ensayo, x_{in} , se realiza un balance de energía en el evaporador.

$$\dot{Q}_{evp} = \dot{m}_{ref}(h_{ref\ evp\ out} - h_{ref\ evp\ in}) \quad (2.9)$$

Siendo \dot{m}_{ref} el flujo másico del refrigerante, que se obtiene mediante el caudalímetro Coriolis. Despejando en (2.9):

$$h_{ref\ evp\ out} = h_{ref\ evp\ in} + \frac{\dot{Q}_{evp}}{\dot{m}_{ref}} \quad (2.10)$$

El calor \dot{Q}_{evp} puede ser calculado mediante el flujo de agua que se utiliza para evaporar el refrigerante.

$$\dot{Q}_{evp} = \dot{v}_w \rho_w [T_{w\ evp\ in}, T_{w\ evp\ out}] C_{pw} (T_{w\ evp\ in} - T_{w\ evp\ out}) \quad (2.11)$$



Siendo C_{pw} el calor específico del agua y ρ_w su densidad. El caudal volumétrico, \dot{v}_w , se obtiene mediante el caudalímetro electromagnético, mientras que las temperaturas de entrada y salida al intercambiador se obtienen con RTDs.

La entalpía a la entrada del evaporador se puede calcular en base a su temperatura y densidad:

$$h_{ref\ evp\ in} = h_{ref}[T_{ref}, \rho_{ref}] \quad (2.12)$$

El valor de densidad se obtiene mediante el caudalímetro Coriolis, mientras que una RTD a la entrada de la sección de ensayo da el valor de temperatura.

Finalmente considerando que no hay pérdidas entre la salida del evaporador y la entrada a la sección de ensayo se puede establecer que la entalpía a la salida del evaporador es la misma que la entalpía a la entrada de la sección de ensayo:

$$h_{ref\ evp\ out} = h_{ref\ ts\ in} \quad (2.13)$$

Y el título a la salida del evaporador se obtiene de la siguiente manera:

$$h_{ref\ ts\ in} = x_{in}h_g[p_{ts\ in}] + (1 - x_{in})h_f[p_{ts\ in}] \quad (2.14)$$

$$h_{ref\ ts\ in} = h_f + (h_g - h_f)x_{in} \quad (2.15)$$

$$x_{in} = \frac{h_{ref\ ts\ in} - h_f}{h_g - h_f} \quad (2.16)$$

Siendo h_f la entalpía de la porción líquida y h_g la entalpía de la porción gaseosa del estado bifásico. Se evalúan en función de la presión de entrada de la sección de ensayo, $p_{ts\ in}$.

Sustituyendo finalmente el resto de resultados en esta ecuación se obtiene x_{in} de la siguiente manera:

$$x_{in} = \frac{h_{ref\ evp\ in} + \frac{\dot{Q}_{evp}}{\dot{m}_{ref}} - h_f}{h_g - h_f} \quad (2.17)$$



Para obtener el título de vapor a la salida de la sección de ensayo, x_{out} , se tiene en cuenta el intercambio de calor entre el agua de refrigeración y el refrigerante para que este último condense en la sección de ensayo. Este calor se estima como:

$$\dot{Q}_{ts} = \dot{m}_w C_{pw} (T_{w out} - T_{w in}) \quad (2.18)$$

Puesto que se conocen las temperaturas de entrada y salida y también el caudal másico. Además, el calor intercambiado en la sección de ensayo también se puede plantear en función del refrigerante:

$$\dot{Q}_{ts} = \dot{m}_{ref} (h_{ref ts in} - h_{ref ts out}) \quad (2.19)$$

Y despejando:

$$h_{ref ts out} = h_{ref ts in} - \frac{\dot{Q}_{ts}}{\dot{m}_{ref}} \quad (2.20)$$

Donde $h_{ref ts in}$, se ha obtenido anteriormente.

Se utiliza la misma ecuación que en el anterior caso para obtener el título:

$$h_{ref ts out} = x_{out} h_g [p_{ts out}] + (1 - x_{out}) h_f [p_{ts out}] \quad (2.21)$$

Despejando:

$$x_{out} = \frac{h_{ref ts out} - h_f}{h_g - h_f} \quad (2.22)$$

Y sustituyendo:

$$x_{out} = \frac{h_{ref ts in} + \frac{\dot{Q}_{ts}}{\dot{m}_{ref}} - h_f}{h_g - h_f} \quad (2.23)$$

Los cálculos de esta sección se han realizado en base a las siguientes referencias: [2], [5], [7].



2.5. Cálculo de la caída de presión por fricción.

El gradiente de presión de un flujo bifásico está compuesto por los gradientes del momento, los accesorios, la componente gravitatoria y el coeficiente de fricción. El gradiente de presión del momento es estimado mediante las ecuaciones 2.24 a 2.27; el gradiente de la componente gravitatoria es cero debido a que el flujo es puramente horizontal. El gradiente de presión por fricción del flujo bifásico es calculado sustituyendo el gradiente de presión del momento y la caída de presión debido a accesorios por el gradiente experimental de presión.

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{tp} = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{mom} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_{acc} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_g - \left(\frac{dp}{dz}\right)_f \quad (2.24)$$

El gradiente de presión del momento para flujos condensando es calculado como:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{mom} = G^2 \frac{d}{dz} \left[\frac{x^2}{\alpha \rho_v} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_l} \right] \quad (2.25)$$

Donde α es la fracción gaseosa del flujo bifásico. Muchas correlaciones han sido utilizadas para calcular la fracción gaseosa, una de las más utilizadas es la correlación de Zivi [8]:

$$\alpha = \left[1 + \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-1} \quad (2.26)$$

Otras expresiones pueden ser encontradas en la literatura existente, extensivas revisiones de la correlación de la fracción gaseosa fueron documentadas Dalkilic y Wonwises [9] and Winkler et al [10].

El desarrollo del gradiente de presión de los accesorios es explicado en los siguientes puntos.

2.5.1. Caída de presión debido a la contracción y expansión.

Durante el proceso de cálculo la caída de presión en los extremos de la sección de ensayo debe ser tenida en cuenta. Esta caída de presión es debida a la expansión y contracción del flujo a la entrada y salida del conducto de la sección de ensayo. El fluido puede encontrarse en distintos estados: vapor, líquido (una fase) o mezcla (bifásico). Las correlaciones utilizadas en este documento se explicarán más adelante siguiendo la nomenclatura de la figura 9.

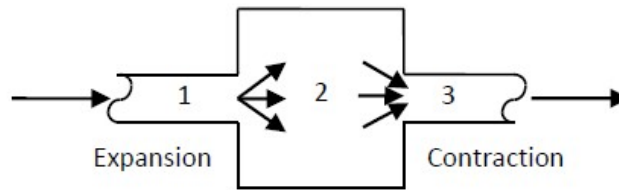


Figura 9. Nomenclatura utilizada en la caracterización de los procesos de contracción y expansión.

$$dp_{channel} = dp_{meas} - (dp_{ex} + dp_{con}) \quad (2.27)$$

2.5.1.1. Flujo monofásico.

Kays and London [11] caracterizaron la caída de presión debida a un cambio brusco de sección introduciendo coeficientes de expansión y contracción que pueden ser calculados mediante las gráficas que proporcionan en su libro. Estas gráficas son las mostradas en las figuras 10 y 11.

De esta manera, la caída de presión en caso de expansión viene dada por la expresión:

$$dp_e = \frac{1}{2} u_1^2 \rho_1 k_e - \frac{1}{2} u_1^2 \rho_1 (1 - \gamma^2) \quad (2.28)$$

$\gamma = \frac{A_1}{A_2}$ y los subíndices 1 y 2 se refieren a entrada y salida de la sección respectivamente.

La caída de presión en caso de contracción viene dada por la expresión:



$$dp_c = \frac{1}{2}u_3^2\rho_3k_c - \frac{1}{2}u_3^2\rho_3(1 - \gamma^2) \quad (2.29)$$

Donde u_3 , es la velocidad a la salida, ρ_3 es la densidad del fluido a la entrada, $\gamma = \frac{A_2}{A_3}$ en este caso, y k_e y k_c son los coeficientes de expansión y contracción respectivamente.

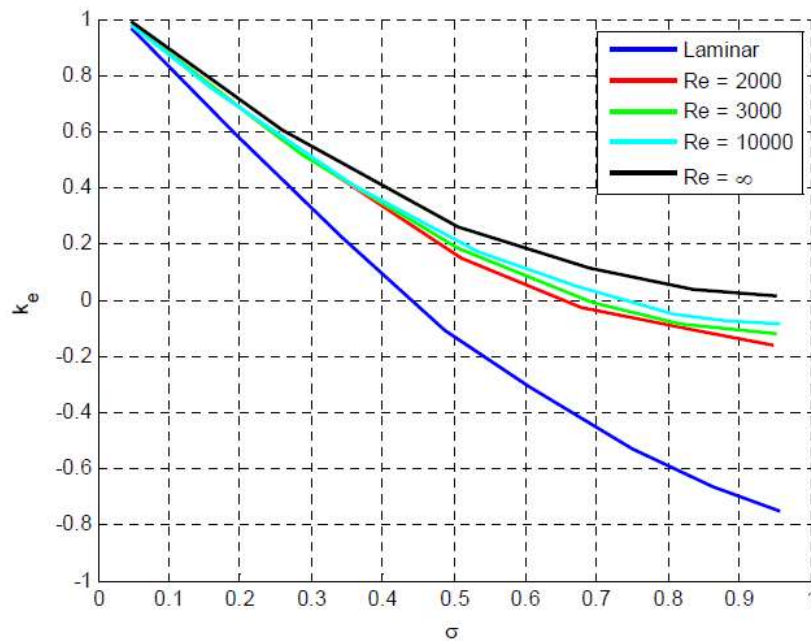


Figura 10. Coeficiente de expansión de Kays y London.

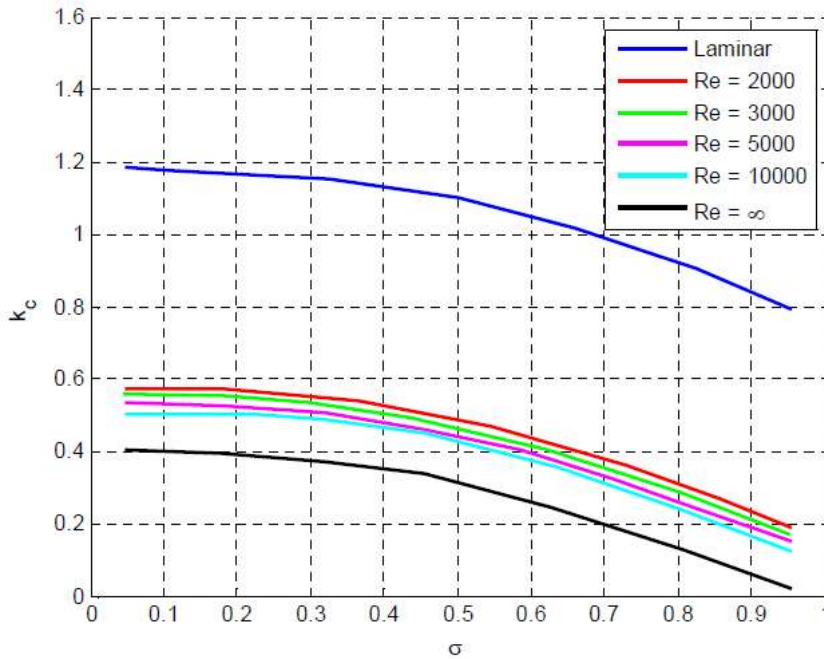


Figura 11. Coeficiente de compresión de Kays y London.

Las ecuaciones de estos coeficientes en función del número de Reynolds.

$$k_e = \begin{cases} 0.009\gamma^2 - 0.288\gamma + 1.269 & \text{Si es laminar} \\ 0.009\gamma^2 - 0.227\gamma + 1.202 & \text{Si } Re = 2000 \\ 0.009\gamma^2 - 0.227\gamma + 1.203 & \text{Si } Re = 3000 \\ 0.009\gamma^2 - 0.224\gamma + 1.198 & \text{Si } Re = 5000 \end{cases} \quad (2.30)$$

$$k_c = \begin{cases} -0.004\gamma^2 + 0.012\gamma + 1.172 & \text{Si es laminar} \\ -0.004\gamma^2 + 0.014\gamma + 0.559 & \text{si } Re = 2000 \\ -0.004\gamma^2 + 0.013\gamma + 0.541 & \text{Si } Re = 3000 \\ -0.004\gamma^2 + 0.010\gamma + 0.529 & \text{Si } Re = 5000 \end{cases} \quad (2.31)$$

En la instalación de estudio, los valores de k_e y k_c son obtenidos mediante una interpolación lineal en base al número de Reynolds.

Abdelall et al [12] realizaron experimentos con flujo monofásico estudiando la caída de presión causada por cambios bruscos en las secciones de paso del fluido y propusieron una ecuación general para la expansión del fluido:

$$dp_e = \frac{1}{2}u_1^2\rho_1 k_e - \frac{1}{2}u_1^2\rho_1(1 - \gamma^2) \quad (2.32)$$



Donde el coeficiente de expansión es dado por $k_e = (1 - \gamma)^2$, el radio de las secciones es $\gamma = \frac{A_1}{A_2}$, y u es la velocidad de entrada. Los subíndices 1 y 2 se refieren a entrada y salida respectivamente.

Para una contracción de sección propusieron:

$$dp_c = \frac{u_3^2}{2} \rho_3 \left[\left(1 - \frac{1}{C_c}\right)^2 + (1 - \gamma^2) \right] \quad (2.33)$$

Donde u_3 es la velocidad de salida, el coeficiente de vena contracta, C_c viene dado por:

$$C_c = 1 - \frac{1 - \gamma}{2.08(1 - \gamma) + 0.5371} \quad (2.34)$$

Y $\gamma = \frac{A_2}{A_3}$. Los subíndices 2 y 3 se refieren a la entrada y a la salida respectivamente.

2.5.1.2. Flujo bifásico

Se pueden encontrar distintos modelos en la literatura existente. Entre ellos, se destacarán unos cuantos.

Hewitt et al [13] expusieron modelos homogéneos que predicen los datos experimentales para contracciones repentinas mejor que los modelos de flujo separado. Lo contrario ocurre sin embargo para expansiones repentinas.

Así, para expansiones bruscas propusieron:

$$dp_e = \frac{G^2(1 - \gamma)}{\rho_l} \phi_s \quad (2.35)$$

Donde ϕ_s viene dado por:

$$\phi_s = \frac{(1 - x)^2}{(1 - \alpha_g)} + \frac{\rho_l x^2}{\rho_g \alpha} \quad (2.36)$$

Y para contracciones bruscas:



$$dp_c = \frac{G^2}{2\rho_l} \left[\left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 + \left(1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \right] \phi_H \quad (2.37)$$

Donde $\gamma = \frac{A_1}{A_2}$, C_c es el coeficiente de contracción dado por Chisholm como:

$$C_c = \frac{1}{0.639[1 - \gamma]^{1/2} + 1} \quad (2.38)$$

Y el multiplicador homogéneo, ϕ_H es dado por:

$$\phi_H = \left[1 + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \right] \quad (2.39)$$

Kandlikar propuso la misma expresión para el modelo de contracción pero para el de expansión propuso $dp_e = G^2 \gamma (1 - \gamma) \phi'_s$ con el siguiente multiplicador:

$$\phi_s = 1 + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) [0.25x(1 - x) + x^2] \quad (2.40)$$

Una expresión alternativa para ϕ_s fue propuesta por Chisholm (Hewitt et al [13]).

Coleman y Krause [14] mostraron que estas expresiones usadas comúnmente para estimar pérdidas de presión en flujos bifásicos, subestiman las pérdidas de presión encontradas en las cabezeras de los micro-canales. Además, señalan que la recuperación de la presión tras la expansión es menor del 5% de la variación de la presión total y eso no fue tenido en cuenta. Afirman que eso es normal para ratios de área menores de 0.1. En el caso de contracción súbita, modificaron la correlación propuesta por Schimdt and Friedel [15], de manera que la caída de presión viene dada por:

$$dp_c = \frac{G_{vc}^2}{2\rho_{tp}} [(1 - \gamma^2 C_c^2)] - 2C_c(1 - C_c) \quad (2.41)$$

Donde $\gamma = A_2/A_3$ y el coeficiente de vena contracta viene dado por:



$$C_c = 1 - \frac{1 - \gamma}{2.08(1 - \gamma) + 0.5371} \quad (2.42)$$

La densidad bifásica ρ_{tp} puede ser evaluada usando la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\rho_{tp}} = \frac{x}{\rho_g} + \frac{(1 - x)}{\rho_l} \quad (2.43)$$

Y la velocidad de flujo, G_{vc} viene dada por una expresión ajustada por Coleman y Krause [14] $G_{vc} = CG_{tube}$ con $C = 2.08$. Los valores de las diferentes variables termodinámicas han sido calculados en condiciones de entrada.

En este caso, la correlación de Schmidt y Friedel [15] se usa para expansiones repentinas en el flujo bifásico.

$$dp_e = \frac{G \left[\frac{\gamma_{1,2}}{\rho_{eff,1}} - \frac{\gamma_{1,2}^2}{\rho_{eff,2}} - f_{Exp} \rho_{eff,1} \left(\frac{x}{\rho_{g,1} \eta_1} - \frac{1 - x}{\rho_{l,1} (1 - \eta_1)} \right)^2 (1 - \sqrt{\gamma_{1,2}})^2 \right]}{1 - \Gamma_{Exp} (1 - \gamma_{1,2})} \quad (2.44)$$

Donde

$$\frac{1}{\rho_{eff}} = \frac{x^2}{\rho_g \eta} + \frac{(1 - x)^2}{\rho_l (1 - \alpha)} + \rho_f (1 - \varepsilon) \left(\frac{\alpha_E}{1 - \alpha_E} \right) \left[\frac{x}{\rho_g \eta} - \frac{1 - x}{\rho_l (1 - \eta)} \right]^2 \quad (2.45)$$

$$\eta = 1 - \frac{1 - x}{1 - 2x + \sqrt{1 + 4x(1 - x) \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right)}} \quad (2.46)$$

$$\eta_E = 1/S \left[1 - \frac{1 - x}{(1 - x(1 - 0.05We^{0.27}Re^{0.05}))} \right] \quad (2.47)$$

$$S = \frac{x}{1 - x} \frac{1 - \eta}{\eta} \frac{\rho_l}{\rho_g} \quad (2.48)$$



$$We = Gx^2 \frac{D}{\rho_g \sigma} \frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g} \quad (2.49)$$

$$Re = \frac{G(1-x)d}{\mu_l} \quad (2.50)$$

$$\Gamma_{Exp} = 1 - \gamma_{2.3}^{0.25} \quad (2.51)$$

$$f_{Exp} = 4.9 \times 10^{-3} x^2 (1-x)^2 \left(\frac{\mu_{l,1}}{\mu_{g,1}} \right)^{0.7} \quad (2.52)$$

Una revisión de otras expresiones para la evaluación de la recuperación de la presión en expansiones bruscas se puede encontrar en Ahmed et al. [16] donde se comparan diferentes modelos. Zhang y Webb [17] recomiendan el uso de las ecuaciones propuestas por Collier and Thome [18].

Los cálculos de esta sección y el uso de bibliografía se han realizado en base al trabajo de Alejandro López Belchí [2], [5].



Capítulo 3. SENSORES

En este capítulo se van a describir con profundidad las tecnologías ligadas a los sensores que serán utilizados en la instalación, así como su funcionamiento y constitución interna. Además, al final se dará una pequeña explicación de los tipos de medida de voltaje para la obtención de datos que proporcionan los sensores.

3.1. Tecnología básica de sensores

Un sensor es un dispositivo que convierte el fenómeno físico en una señal eléctrica. Como tal, los sensores representan parte de la interconexión entre el mundo físico y el mundo de los dispositivos eléctricos, como los ordenadores. La otra parte de esta interconexión viene representada por los actuadores, los cuales convierten las señales eléctricas en fenómenos físicos.

¿Por qué preocupa tanto esta interconexión? En los últimos años, la enorme capacidad para procesar información ha sido posible gracias a la industria de la electrónica. El ejemplo más significativo de ello es el ordenador personal. Además, la posibilidad de disponer de microprocesadores económicos está teniendo un tremendo impacto en el diseño de circuitos desde la industria automovilística a las microondas o incluso los juguetes.

Todos estos microprocesadores necesitan entradas eléctricas para recibir información o instrucciones. Por lo tanto, junto con la capacidad de tener microprocesadores económicos ha crecido el uso de sensores para una gran variedad de mediciones. Es más, desde que la salida de los sensores es eléctrica, estos tienden a caracterizarse de la misma forma que los dispositivos electrónicos. Las hojas de datos de muchos sensores están estructuradas como si de un producto electrónico se tratase.

Sin embargo, hay muchos formatos en existencia, y no hay nada parecido a un consejo internacional de estandarización de especificaciones de sensores. El diseñador del sistema se encontrará con una variedad de interpretaciones para los parámetros de funcionamiento del sensor, y esto puede resultar confuso. Es importante darse cuenta que esta confusión no es debida a la incapacidad de explicar el significado de los términos, más bien es un resultado del hecho de que diferentes partes de la comunidad de los sensores han crecido habituándose al uso de estos términos de manera diferente.



3.2. Definición de las características funcionales de un sensor

A continuación, se describen algunas de las características más importantes de los sensores:

- **Función de transferencia:** muestra la relación funcional entre la señal de entrada física y la señal de salida eléctrica. Normalmente, esta relación viene representada como una gráfica entre las señales de entrada y salida, y los detalles de esta relación pueden constituir la descripción completa de las características del sensor. Para los sensores que son calibrados individualmente, esta descripción viene en forma de curva de calibración.
- **Sensibilidad:** se define en términos de la relación entre la señal de entrada física y la señal de salida eléctrica. Es generalmente la proporción entre un pequeño cambio en la señal eléctrica frente a un pequeño cambio en la señal física. Por lo tanto, se puede expresar como la derivada de la función de transferencia respecto a la señal física. Un termómetro tendrá una "alta sensibilidad" si un pequeño cambio en la temperatura resulta como un gran cambio de diferencia de potencial.
- **Span o rango dinámico:** El rango de las señales de entrada físicas que vayan a ser convertidas a señal eléctrica por un sensor es el rango dinámico o span. Las señales fuera de este rango se espera que tengan una alta inexactitud, y por lo tanto, inaceptable. El span o rango dinámico es normalmente especificado por el fabricante del sensor como el rango sobre el cual las características del sensor se pueden aplicar.
- **Exactitud o incertidumbre:** La incertidumbre es generalmente definida como el mayor error esperado entre la señal de salida ideal y la real. Normalmente se especifica como una fracción de la escala completa o una fracción de la lectura. La exactitud es generalmente considerada por los metrologistas como un término cualitativo, mientras que la incertidumbre es cuantitativa.
- **Histéresis:** Algunos sensores no vuelven al mismo valor de salida cuando el estímulo de entrada realiza ciclos ascendentes y descendentes. El ancho del error esperado en términos de la magnitud medida se define como histéresis.
- **No linealidad (a veces llamado linealidad):** La desviación máxima de una función de transferencia lineal sobre el rango dinámico especificado. Hay varias medidas de este error. La más común compara la función de transferencia actual con la "mejor tendencia lineal", que se sitúa entre dos líneas paralelas que limitan a la función sobre todo el rango dinámico del dispositivo. Otras líneas de referencia se pueden usar, así que el usuario debe ser cuidadoso al comparar haciéndolo con la misma referencia.



- **Ruido:** Todos los sensores producen algo de ruido añadido a la señal de salida. En algunos casos, el ruido del sensor es menor que el ruido del elemento siguiente en la electrónica, o menor que las fluctuaciones en la señal física, en cuyo caso no es importante. En muchos otros casos existe la situación en la que el ruido del sensor limita la funcionalidad del sistema basado en el sensor. El ruido se distribuye a través del espectro de frecuencias normalmente. Muchas fuentes de ruido producen una distribución de ruido blanco, lo que quiere decir que la densidad de ruido espectral es la misma en todas las frecuencias. Para el ruido blanco, la densidad espectral de ruido viene caracterizada en unidades de voltios/Hz. Una distribución de esta naturaleza añade ruido a la medida con una amplitud proporcional a la raíz cuadrada del ancho de banda de la medida. Como la relación entre el ancho de banda y el tiempo de medida es inversamente proporcional, se puede decir que el ruido decrece con la raíz cuadrada del tiempo de medida.
- **Resolución:** La resolución de un sensor se define como la mínima fluctuación de señal detectable. Como las fluctuaciones son fenómenos temporales, hay una relación entre la escala de tiempo de la fluctuación y la amplitud mínima detectable. Por consiguiente, la definición de resolución debe incluir información sobre la naturaleza de la medida que se lleva a cabo.
- **Ancho de banda:** Todos los sensores tienen tiempos de respuesta finitos frente a cambios instantáneos en las señales físicas. Además, muchos sensores tienen tiempos de cadencia que representan el tiempo que tarda la señal de salida en volver a su valor original tras un cambio instantáneo en la señal física. La reciprocidad de estos tiempos corresponde a las frecuencias de interrupción superiores e inferiores, respectivamente. El ancho de banda de un sensor es el rango de frecuencia entre estas dos frecuencias.

3.3. Visión general de sensores

Hay dos tipos de sensores, aquellos que necesitan de una fuente externa de excitación y los que no:

- **Sensores activos:** requieren de una fuente externa de excitación. Pertenecen a este tipo las RTD's y las galgas extensiométricas.
- **Sensores pasivos:** Son auto generadores y no necesitan fuente externa, pertenecen este grupo los termopares, fotodiodos y piezoeléctricos.

En la Tabla 1 se muestran algunos sensores típicos y sus salidas.



Propiedad	Sensor	Activo/Pasivo	Salida
Temperatura	Termopar	Pasivo	Tensión
	Silicio	Activo	Tensión/Intensidad
	RTD	Activo	Resistencia
	Termistor	Activo	Resistencia
Fuerza/Presión	Galga extensiométrica	Activo	Resistencia
	Piezoeléctrico	Pasivo	Tensión
Aceleración	Acelerómetro	Activo	Capacidad
Posición	LVDT	Activo	Tensión AC
Intensidad luminosa	Fotodiodo	Pasivo	Intensidad

Tabla 1. Sensores típicos y sus salidas.

3.4. Sensores de caudal

Los medidores de flujo son utilizados en muchas aplicaciones de monitorización y control, para medir tanto corrientes líquidas como gaseosas. Hay muchas formas de definir flujo (máscico, volumétrico, laminar, turbulento). Normalmente la cantidad de sustancia fluyendo (flujo máscico) es la más importante, y si la densidad del fluido es constante, una medida del flujo volumétrico es un sustituto válido y generalmente más sencillo de medir. Hay numerosas tecnologías adecuadas y tipos de sensores para este propósito.

3.4.1. Métodos de medida de caudal

El caudal es típicamente obtenido midiendo primero la velocidad del fluido en la tubería, conducto u otras estructuras, y después multiplicándolo por el área transversal conocida en el punto de medida. Los métodos para medida de flujos líquidos incluyen sistemas de presión diferencial, sensores tipo vortex, sensores de flujo positivo, de turbinas, electromagnéticos, ultrasónicos y térmicos. No obstante, sólo se explicarán los sensores que forman parte de esta instalación.

3.4.1.1. Medidores de caudal másico

Los procesos relacionados con la masa, como las reacciones químicas y la transferencia de calor requieren medidas de flujo más exactas y esto ha llevado al desarrollo de los medidores de caudal másico. Hay disponibles varios diseños, pero el más común es el de efecto Coriolis, cuyo funcionamiento está basado en el fenómeno llamado efecto Coriolis. Los medidores de efecto Coriolis son medidores reales de gasto másico directo, en oposición a aquellos que determinan el flujo volumétrico.

Como la masa no cambia, la medida es lineal sin tener que ser ajustado por variaciones de las propiedades del líquido. Este medidor es especialmente útil para medir líquidos con una viscosidad que varía con la velocidad a temperaturas y presiones determinadas.

Hay disponibles varios diseños de medidores de efecto Coriolis (un ejemplo de un tipo de diseño se puede observar en la figura 12). Uno muy conocido es el que tiene un tubo en forma de "U" encerrado en una cámara con un sensor y conectado a la unidad de electrónica. La electrónica puede ser instalada in situ o retirada del sensor. Dentro de la cámara del sensor, el tubo en forma de "U" vibra a su frecuencia natural debido a un dispositivo magnético situado en la curva del tubo. Cuando el líquido fluye a través del tubo, se ve forzado a realizar el movimiento vertical del tubo lo que causa que ejerza una fuerza sobre el tubo y tienda a retorcerlo. Esta deformación es directamente proporcional al gasto másico del fluido a través del tubo. Los sensores magnéticos ubicados a ambos lados del tubo registran las velocidades del mismo, que varían conforme se retuerce el tubo. Los sensores transmiten esta información a la unidad electrónica, donde se procesa y convierte a un voltaje proporcional al gasto másico. Este medidor tiene un gran rango de aplicaciones, desde adhesivos y revestimientos a nitrógeno líquido.

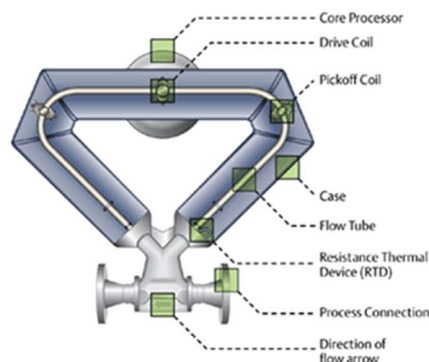


Figura 12. Medidor de efecto coriolis.

3.4.1.2. Medidores electromagnéticos

El funcionamiento de estos medidores se basa en la Ley de Faraday de la inducción electromagnética, la cual estipula que se inducirá un voltaje cuando un conductor se desplaza a lo largo de un campo magnético.

El fluido es el conductor, y se crea un campo magnético a través de unas bobinas externas a la conducción del fluido. El voltaje producido es proporcional al flujo. Los electrodos montados en las paredes de la conducción detectan esta diferencia de potencial inducida, la cual es medida por el elemento secundario.

Los caudalímetros electromagnéticos se aplican en la medida de flujo en conducciones (incluida el agua), donde se necesita una alta calidad y bajo mantenimiento. El coste de este tipo de medidores es relativamente mayor en comparación con tipos de medidores. Poseen muchas ventajas incluyendo la medida de líquidos corrosivos y lodos, además pueden medir flujos inversos. Un ejemplo visual del principio en el que se basan este tipo de sensores se puede apreciar en la figura 13.

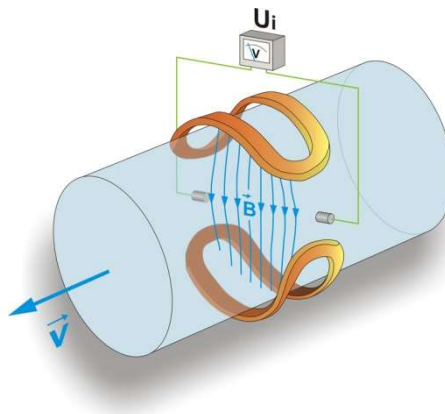


Figura 13. Principio medidor electromagnético.

3.5. Sensores de presión

3.5.1. Sensores de presión piezorresistivos

Los sensores de presión convierten la entrada de presión en una salida eléctrica que permite medir la presión, fuerza y flujo de aire. Dondequiera que presión, fuerza o flujo de aire deba ser controlado de manera precisa, existe potencialmente el uso de un sensor de presión. Los sensores actuales proporcionan un alto grado de respetabilidad, baja histéresis y alta estabilidad en un gran rango de presiones.



3.5.1.1. Fundamentos de la tecnología de sensores de presión

La mayoría de los sensores de presión están fabricados usando tecnología de silicio y técnicas comunes a la industria de los semiconductores. Por ello, mucha de la terminología usada en la industria también se aplica a la tecnología de sensores de presión. La tecnología de semiconductores piezorresistivos de iones implantados domina el mercado de componentes para sensores de presión por buenas razones.

Los sensores piezorresistivos son también llamados sensores IC (circuito integrado), sensores de estado sólido, sensores monolíticos (formados por un único cristal de silicio) o simplemente sensores de silicio. Son procesados en forma de oblea o "galleta", donde cada "galleta" contendría unos cuantos cientos de terminaciones de sensor, dependiendo del tamaño de las mismas. Un sensor típico mide unos 2 x 2 mm.

Los sensores piezorresistivos de silicio contienen un elemento sensor compuesto de un chip de silicio con un diafragma circular muy fino y cuatro piezorresistencias. Estas, casi idénticas, resistencias de estado sólido se encuentran enterradas bajo la superficie del silicio.

La piezorresistencia de un sensor se refiere al cambio en la resistencia causado por tensiones, cuando la presión o una fuerza son aplicadas al diafragma. La presión fuerza al diafragma a flexionarse, induciendo una tensión en el mismo y deformando también las resistencias bajo la superficie.

El valor de las resistencias cambia dependiendo de la intensidad de la presión aplicada al diafragma. Por lo tanto, un cambio de presión (entrada mecánica) es convertido en un cambio de resistencia (salida eléctrica). Este elemento sensor convierte la energía de una forma en otra, de ahí viene el término transductor de presión.

Los sensores de presión son producidos en un primer lugar por implantación iónica de las cuatro piezorresistencias bajo la superficie de silicio. La implantación iónica se usa cada vez más para proporcionar un mejor rendimiento sobre sensores producidos por difusión.

Tras haber formado las cuatro piezorresistencias, el diafragma se crea controlando la forma por grabado químico en la parte opuesta de la ubicación de las cuatro piezorresistencias. La parte sin grabar de la rodaja de silicio proporciona una frontera rígida al diafragma y es una superficie para montarlo en otro miembro.

El espesor del diafragma determina el rango de presión y la sensibilidad del sensor. Sin embargo, esta relación no es lineal. Por ejemplo, doblar el espesor del diafragma reduce la sensibilidad en un factor de cuatro. Normalmente, los espesores son de 5 a 200 micrones, dependiendo del rango de presiones. La sobrepresión es un término utilizado para especificar la presión máxima que es posible aplicar al sensor sin causar un cambio permanente en sus características de salida.

Los sensores de presión con diafragma de silicio son extremadamente fiables porque el silicio es un material ideal para soportar la fuerza aplicada y los medidores implantados no están sometidos a problemas de adherencia.

Como un cristal perfecto, el silicio no se deforma de forma permanente y vuelve a su forma original. Las "galletas" de silicio son mejores que las metálicas para los diafragmas de los sensores de presión ya que ofrecen una elasticidad extrema dentro de su rango de presiones. El diafragma de silicio sólo falla por ruptura, debida normalmente a sobrepresiones extremas.

Las resistencias del sensor pueden ser conectadas en forma de divisor de tensión o un "puente Wheatstone", donde dos resistencias incrementan su valor con la presión creciente mientras que las otras dos decrecen en valor. Cuando la presión es aplicada al dispositivo mostrado en la figura 14, las resistencias en los brazos del puente varían una cantidad ΔR . La alineación de las resistencias en el silicio determina si la resistencia incrementa o decrece con la presión aplicada.

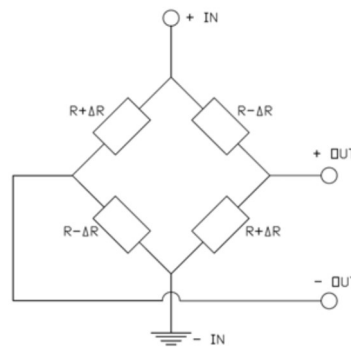


Figura 14. Puente Wheatstone.

3.5.1.2. Tipos de medida de presión

Los sensores de presión están catalogados, en parte, por el tipo de presión que miden. La mayoría de los sensores se ofrecen en series destinadas a medir diferentes tipos de presión: manométrica, diferencial, absoluta o de vacío relativo.

La mayoría de gente está acostumbrada a tratar con la presión manométrica - esto es, la presión relativa a la presión normal atmosférica que le rodea. Como tal, la presión absoluta y los sensores de presión absoluta, los cuales miden presión respecto a un vacío perfecto, se pueden confundir. Como el cero absoluto perfecto en presión es impracticable, la presión absoluta es mucho más difícil de medir. Es más sencillo entender la presión absoluta una vez que se tiene claro conocimiento de la presión diferencial y manométrica.



La presión diferencial es la diferencia de presión entre dos fuentes de presión, por ejemplo, medir en dos puntos la presión para determinar el estado de un filtro. Los sensores de presión diferencial están fabricados para aceptar simultáneamente dos entradas independientes de fuentes de presión. La salida es proporcional a la diferencia de presión ente las dos fuentes. Los sensores de presión diferencial bidireccionales son aquellos que permiten tener la entrada de mayor presión por cualquiera de las dos entradas de las que disponen.

Cuando una de estas dos presiones es la presión ambiente, entonces se llama presión relativa (o presión manométrica). Por lo tanto, la presión relativa es una presión diferencial usando como presión de referencia la presión atmosférica.

La presión absoluta se mide con respecto a la presión de vacío de referencia. Los sensores de presión absoluta son utilizados para medir cambios en la presión barométrica o como altímetros. Estas aplicaciones requieren una referencia fija de presión ya que no pueden referenciarse a la presión ambiente que les rodea.

Los sensores de presión absoluta deben medir la presión de entrada respecto a una presión nula (un vacío total a un lado del diafragma).

Los sensores de presión absoluta se pueden hacer cerrando herméticamente la cámara de referencia a un lado del elemento sensor. La presión a medir se mide de manera relativa a esa presión de referencia. El "vacío" actual con que se sella el sensor, es aproximadamente 25 mtorr. Si el gas se queda atrapado en la cámara de referencia, ejercerá presión durante la expansión y contracción con la temperatura de acuerdo a la Ley de Boyle, por lo que este vacío cercano se usa como referencia para eliminar cualquier error térmico potencial. Una de las ventajas de los circuitos integrados con sensores piezorresistivos es el pequeñísimo volumen atrapado en la cámara de referencia, lo que, en conjunto con un sello silicio-silicio consiguen un dispositivo fiable y estable frente a la temperatura y tiempo.

Por último, la presión de vacío relativa es una forma de medida de presión en la que la presión de vacío se referencia a la presión ambiente.

3.5.2. Sensores de presión piezoeléctricos

Los hermanos Pierre y Jaques Curie descubrieron el fenómeno de la piezoelectricidad en 1880. Encontraron que algunos materiales cristalinos generaban una polarización eléctrica cuando se sometían a cargas mecánicas a lo largo de las direcciones de los cristales. Entre los materiales investigados investigaron el cuarzo y la turmalina, dos cristales que aún hoy se siguen usando en sensores piezoeléctricos. El primer sensor de presión piezoeléctrico data de 1920, pero los sensores no fueron comerciales hasta 1950 cuando los electrómetros de calidad empezaron a estar disponibles. A día de hoy, los sensores de presión piezoeléctricos son ampliamente usados en laboratorios e industria.



La aplicación principal se puede encontrar en motores de combustión, moldeo por inyección y balística, pero pueden ser utilizados en muchos campos donde se requieran medidas exactas o la monitorización de variaciones de presión. Las ventajas principales de estos sensores son:

- Amplio rango de medida, span hasta 10^8 .
- Alta frecuencia natural.
- Alta linealidad entre la señal de salida y la carga aplicada.
- Alta reproducibilidad y estabilidad de las propiedades (cuando se usan mono cristales).
- Amplio rango de temperatura de operación.
- Inmune a los campos eléctricos y magnéticos.

Se piensa que los transductores piezoeléctricos basados en el efecto piezoeléctrico directo sólo se pueden utilizar para mediciones dinámicas. Esto es en parte cierto, debido a que sólo reaccionan ante una variación de la carga y por lo tanto no pueden realizar medidas estáticas. Sin embargo, un buen sensor con un elemento sensor hecho de un mono-cristal, en conjunto con la electrónica adecuada puede ser utilizado para medidas muy exactas por debajo de 0.1 mHz. En otras palabras, medidas cuasi estáticas de varias horas son posibles.

Estos sensores son llamados sensores activos, ya que no necesitan de una fuente externa de excitación. Disponen de una salida de carga que requiere una carga externa para la conversión de voltaje. Básicamente, hay dos tipos de convertidores, el electrómetro y el amplificador de carga. El amplificador de carga fue inventado en 1950 por W.P. Kistler y gradualmente reemplazó al electrómetro durante 1960`s. La introducción de circuitos MOSFET o JFET y el desarrollo de materiales de alto aislamiento como Teflon® y Kapton® mejoraron enormemente su función e impulsaron el campo de las medidas piezoeléctricas en todas las áreas de tecnología moderna.

3.5.2.1. Piezoelectricidad

La piezoelectricidad es básicamente definida como una interacción lineal electromecánica en un material sin tener centro de simetría. Se distingue entre el efecto directo y el efecto piezoeléctrico convertido. En el primer caso, una carga o deformación sobre el cristal induce una carga o potencial eléctrico proporcional. En el segundo caso, un campo eléctrico aplicado al cristal induce una deformación mecánica o carga proporcional al campo. Este documento sólo se centra en los sensores basados en aquellos que se comportan como el primer caso que se describen como:

$$D = \epsilon \cdot E + d \cdot X$$



Donde D es el desplazamiento inducido eléctricamente, E el campo eléctrico aplicado y X la tensión aplicada al material. La constante dieléctrica ϵ y el coeficiente piezoeléctrico d , describen las características del material. D y E son vectores, ϵ es un tensor de segundo orden, d un tensor de tercer orden y X un tensor de cuarto orden. Esto quiere decir que las propiedades piezoeléctricas son anisotrópicas, los coeficientes activos para d y ϵ se determinan por simetría del cristal. La orientación del elemento cristalino de medida es crítica y determina sus propiedades.

3.5.2.2. Corte longitudinal y transversal, efecto de volumen

En un corte longitudinal, la superficie A_Q sobre la cual la carga Q incide es la misma que A_F sobre la cual la carga F es aplicada. La sensibilidad piezoeléctrica depende exclusivamente del coeficiente piezoeléctrico longitudinal d_L . En cambio, en un corte transversal, la carga inducida y la carga aplicada no comparten la misma superficie. La sensibilidad depende tanto del coeficiente piezoeléctrico transversal d_T como del ratio A_Q/A_F .

Corte longitudinal: $Q = d_L \cdot F$

Corte transversal: $Q = d_L \cdot F \cdot A_Q/A_F = d_T \cdot F \cdot l/t$

donde l y t son la longitud y espesor del bloque respectivamente.

La ventaja del corte transversal es que la sensibilidad se puede incrementar por el factor geométrico l/t , siempre que los coeficientes longitudinal y transversal sean los mismos. Este es el caso del cuarzo y todos los cristales que pertenecen a la misma simetría que el cuarzo. Para la turmalina, niobato de litio, tantalato de litio y piezocerámicas, el coeficiente transversal es solamente $1/10^{\text{th}}$ a $1/3^{\text{rd}}$ del coeficiente longitudinal; por lo tanto, los cortes transversales son raras veces usados.

Tanto los efectos longitudinales como transversales son básicamente uniaxiales. La presión objeto de medida se convierte a una fuerza uniaxial debido a un diafragma. Los efectos volumétricos difieren de los efectos uniaxiales en los cuales la fuerza se aplica en todas las superficies del elemento sensor. La sensibilidad es la suma de las contribuciones longitudinal y transversal.

Efecto de volumen: $Q = (d_L \cdot p + 2 \cdot d_T \cdot p) \cdot A_Q = d_h \cdot p \cdot A_Q$

donde d_h es el coeficiente piezoeléctrico hidrostático y p es la presión aplicada. Hágase notar que el coeficiente piezoeléctrico hidrostático es siempre nulo para el cuarzo y todos los cristales con la misma simetría que el cuarzo. El efecto de volumen es generalmente usado en sensores de ondas de choque o hidrófonos, donde la dirección de propagación de la onda no se conoce.

Para los efectos longitudinales, transversales y de volumen, la carga es aplicada perpendicularmente a la superficie piezoeléctrica activa.



3.5.2.3. Materiales piezoeléctricos

El elemento captador es el corazón del transductor y debería ser seleccionado con cuidado. Compensaciones electrónicas o por software para "malas" propiedades del cristal son difícilmente posibles. Alta sensibilidad, alta resistencia de aislamiento, gran resistencia mecánica, gran rigidez y baja dependencia de las propiedades con un gran rango sobre la temperatura, baja anisotropía, relación lineal entre la carga y la tensión mecánica, no tener envejecimiento, ser insensible a cambios de temperatura (no piroelectricidad), facilidad de mecanizado y bajos costes de producción son todos los requisitos para un buen material piezoeléctrico. Por supuesto, el material ideal que cumple todo lo mencionado no existe.

El cuarzo ha sido y es el material que se sigue usando para la mayoría de los sensores de presión. Es muy estable, con buenas propiedades mecánicas, se puede usar hasta los 400°C, tiene una mínima desviación hasta los 350°C, no es piroeléctrico y está disponible a bajo precio. La única desventaja del cuarzo es su relativa baja sensibilidad y su tendencia a hermanarse bajo cargas muy altas.

La turmalina tiene menor sensibilidad que el cuarzo, pero su rango de temperaturas se extiende hasta los 600°C. Sin embargo, es piroeléctrica y sólo está disponible como cristales naturales. El niobato de litio y el tantalato de litio tienen una mayor sensibilidad, pero son altamente piroeléctricos y su aislamiento resistivo es muy bajo, lo que los limita a aplicaciones dinámicas.

Los cristales del grupo CGG ($\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$ y langasita) han sido estudiados en los últimos 20 años. Pertenecen a la misma simetría que el cuarzo, no son piroeléctricos y son estables hasta su punto de fusión (1300°C) por lo que sus propiedades permanecen muy estables hasta altísimas temperaturas sin sufrir hermanamiento. Sin embargo, el crecimiento de estos cristales es mucho más complejo que el del cuarzo.

El ortofosfato de galio tiene la misma estructura cristalina que el cuarzo. Es el doble de sensible que el cuarzo y prácticamente constante hasta 500°C y su temperatura de operación llega a 600°C. Sin embargo, es muy difícil hacerlo crecer, puede llevar desde varios meses a un año, y no está disponible en cristales grandes.

Los piezocerámicos basados en PZT y metanobiato de plomo tienen una sensibilidad muy grande, hasta 100 veces la del cuarzo, pero tienen una baja linealidad y un amplio efecto piroeléctrico que los limita a muchas aplicaciones en las que la exactitud no es crítica.

Los piezocerámicos de alta temperatura (materiales basados en titanato de bismuto) se pueden utilizar hasta los 500 o 600°C, pero sufren problemas parecidos a los PZT. Su sensibilidad es sobre 5 a 10 veces mayor que la del cuarzo. Se han usado sin problemas en aplicaciones de alta temperatura.



3.6. Medidores de temperatura

Como la temperatura puede tener un efecto significativo en los materiales y procesos a nivel molecular, es la variable más registrada de todas. La temperatura se define como un grado de calentamiento o enfriamiento referenciado a una escala específica. Se puede definir también como la energía térmica en un objeto o sistema. La energía térmica está directamente relacionada con la energía molecular (vibración, fricción y oscilación de las partículas dentro de una molécula): a mayor energía térmica, mayor energía molecular.

Los sensores de temperatura detectan cambios en un parámetro físico como es la resistencia o el voltaje de salida que corresponde con un cambio de temperatura. Hay dos formas básicas de sensores de temperatura:

- Sensores de temperatura de contacto que necesitan estar en contacto físico con el medio u objeto de medida. Se pueden utilizar para monitorizar la temperatura de sólidos, líquidos o gases dentro de un amplio rango de temperaturas.
- Sensores de temperatura sin contacto que interpretan la energía radiante de una fuente de calor en forma de energía emitida en el espectro infrarrojo. Este método puede ser utilizado para monitorizar sólidos y líquidos no reflectivos pero no es efectivo con los gases debido a su transparencia natural.

3.6.1. Tipos de sensores y tecnologías

Los sensores de temperatura se componen de tres familias: electromecánicos (termostatos), electrónicos (sensores de silicio, sensor de infrarrojos, termopares) y resistivos (termistores, RTD's). Los electromecánicos no se utilizarán en esta instalación, por lo que el siguiente apartado sólo se centrará en explicar el funcionamiento teórico de los electrónicos y resistivos.

3.6.1.1. Electrónicos

Termopares

Los termopares están formados por dos conductores metálicos distintos o aleaciones que se unen al final de un circuito. Los termopares no tienen elementos sensitivos, por lo que están menos limitados que los dispositivos resistivos (RTD's) en términos de materiales utilizados y pueden utilizarse a mayores temperaturas. Normalmente se construyen alrededor de conductores desnudos y son aislados por polvo de cerámica o materiales cerámicos.



Todos los termopares tienen lo que se conoce como un lado "caliente" (o de medida) y otro "frío" (o de referencia). Un extremo del conductor (la zona de medida) se expone a la temperatura del proceso, mientras que el otro es mantenido a la temperatura de referencia. El extremo frío puede estar referenciado a 0°C o estar compensado electrónicamente por el medidor.

Cuando los extremos están sujetos a temperaturas diferentes, por los cables fluirá una corriente proporcional a la diferencia de temperaturas. La temperatura en el extremo de medida se determina conociendo el tipo de termopar utilizado, los milivoltios generados, y la temperatura de referencia del extremo frío.

Los termopares se clasifican por su exactitud debido a su diferencia de potencial o fuerza electromotriz (EMF) frente a la temperatura de respuesta. El potencial de milivoltios es una función de la composición de los materiales y la estructura metalúrgica del conductor. En vez de asignar un valor a una temperatura específica, los termopares proporcionan un error límite estándar cubriendo un rango de temperatura.

3.6.1.2. Dispositivos resistivos

RTD'S

Los dispositivos de resistencia dependiente de la temperatura, como los termistores, emplean una variación en la resistencia eléctrica para medir o controlar la temperatura. Las RTD's consisten en un elemento sensor, cables de conexión entre el elemento y el instrumento de medida y un apoyo para posicionar el elemento en el proceso.

El elemento sensor metálico es una resistencia eléctrica que cambia su resistencia con la temperatura. El elemento normalmente contiene una bobina de cable o película conductora con conductores conectados a ella. Se confina dentro de una carcasa sellada con cerámica o vidrio.

El elemento sensor se debe instalar donde pueda alcanzar la temperatura del proceso rápidamente. Los fiadores de los cables de conexión se deben instalar adecuadamente en aplicaciones de altas vibraciones. Los cables de extensión entre el elemento y el instrumento de medida permiten medir la resistencia desde grandes distancias.



3.6.2. Ventajas y desventajas de cada dispositivo

Termostato bimetalico

- **Ventajas:**

Interfaz directa con la aplicación para una respuesta rápida.

No se necesitan componentes adicionales.

Disponibile en cápsula hermética y no hermética.

Soporta altas corrientes de paso.

Soporta un amplio rango de temperatura.

Bajo precio.

- **Desventajas:**

Menos exacto que los dispositivos electrónicos.

Mayor tamaño que los dispositivos electrónicos.

No puede interactuar con dispositivos electrónicos.

Puede fallar en cierre al final de su vida útil.

Termostato de bulbo

- **Ventajas:**

El control se puede colocar a cierta distancia del sensor.

Disponibile para aguantar excesos de temperaturas.

Amplio rango de temperaturas de operación.

Soporta altas corrientes de paso.

- **Desventajas:**

Gran tamaño.

Relativamente caro.

Aplicaciones potenciales limitados.



Sensores de silicio

- **Ventajas:**

Más económicos que las RTD`s.

Más lineales que los termistores.

Más fáciles de usar que las RTD´s o termopares debido a su mayor salida.

Muchos dispositivos incorporan puerto de comunicaciones.

- **Desventajas:**

No son tan lineales como las RTD´s.

Menos exactos que otros dispositivos electrónicos.

Más costosos que los termistores y termopares.

Rango de temperatura limitado.

Respuesta térmica más lenta que otros dispositivos electrónicos.

Mayores que las RTD`s y termistores.

Necesitan de mayores pozos de inmersión.

Sensores Infrarrojos.

- **Ventajas:**

Permiten la medida sin contacto.

Se pueden montar con cables de fibra óptica para monitorización remota.

Rango típico de 0 a 1000°C.

Exactitud $\pm 1\%$.

- **Desventajas:**

La exactitud se ve afectada por el acabado superficial.

El campo de visión debe ser compatible con el tamaño del objetivo

La temperatura ambiente puede afectar a las lecturas.



Se requiere de un filtro de frecuencias.

Coste elevadísimo e incluso mayor si se necesita circuito de control.

La calibración es dificultosa y costosa.

Se necesitan componentes adicionales para controlar las aplicaciones.

Polvo, gases y otros vapores en el ambiente pueden afectar su precisión.

Termopares

- **Ventajas:**

Su pequeño tamaño proporciona una respuesta rápida.

Relativamente económicos.

Amplio rango de temperaturas.

Más resistentes que las RTD's para aplicaciones vibrantes o de alto choque térmico.

Tipos de calibración ANSI establecidos.

- **Desventajas:**

Se deben proteger de ambientes corrosivos.

Los conectores pequeños tienen menor vida y son menos estables.

Se requieren cables de extensión especiales.

Se necesita una unión de referencia compensada.

Menos estables que las RTD's en medias y altas temperaturas.

Se debe comprobar su funcionamiento bajo condiciones controladas para su uso en aplicaciones críticas.

Son necesarios componentes adicionales para ejecutar el control de aplicaciones.



Termistores

- **Ventajas:**

Componentes de bajo coste.

Respuesta térmica rápida.

Amplio cambio entre resistencia y temperatura.

Tamaño muy reducido lo que proporciona poca inercia térmica y lecturas rápidas.

Hay disponibles resistencias linealizadas.

Altos valores de resistencia por lo que no necesita compensación de los conductores.

- **Desventajas:**

Rango de temperatura limitado.

Menor temperatura de exposición que los RTD's y termopares.

No hay estándar establecido de resistencia.

El autocalentamiento afecta la exactitud.

Los cambios no lineales de la resistencia requieren de componentes adicionales para una medida exacta.

Se necesitan componentes adicionales para el control de las aplicaciones.

RTD's

- **Ventajas:**

Muy exactas y con excelente repetibilidad.

Amplio rango de temperatura dependiendo del tipo.

Muy estables a lo largo del tiempo.

Salidas de tensión mayores que en los termopares.

Linealidad de la resistencia excelente.



La resistencia no varía a lo largo del tiempo.

Medida puntual o por área.

Pequeña variación para una mejor intercambiabilidad.

Pueden conectarse mediante cable estándar a los sistemas de control.

Curvas de resistencia industrialmente establecidas.

- Desventajas:

Mayor coste que los termistores y termopares.

El auto calentamiento de la RTD puede afectar la exactitud del sistema.

Mayor tamaño que los termistores y termopares.

No son tan duraderas como los termopares en aplicaciones vibrantes o de alto shock térmico.

3.6.3. Resumen

Los termistores proporcionan una alta resolución, tienen el mayor rango de aplicación, son los más sensibles, de bajo coste, pero son no lineales y tienen un rango de temperatura limitado.

Los termopares tienen el mayor rango de temperatura y son duraderos incluso para aplicaciones de alta vibración y gran shock térmico, pero necesitan de un cable de extensión especial.

Los RTD`s son casi lineales y son muy exactos y estables, pero son grandes y costosos.

Los dispositivos de silicio son económicos y casi lineales, pero tienen un rango de temperatura limitado. En la tabla 2 se recogen los valores de temperatura máxima y mínima entre los que pueden operar los distintos tipos de sensores. [4], [5]



Elemento	Mínima temperatura (°C)	Máxima temperatura (°C)
Termostato bimetálico	-85	+371
Termostato de bulbo	-35	+400
Sensor de silicio	-271	+200
Sensor infrarrojo	0	+1000
Termopares	-200	+2315
Termistor	-100	+300
RTD'S	-200	+650

Tabla 2. Rangos de temperatura de los sensores de medida de temperatura.

3.7. Tipos de medida de voltaje

La mayoría de los sensores que se van a utilizar en este proyecto trabajan con señales de salida de tensión mediante las cuales se obtienen los datos que nos proporcionan y, los que utilizan señales de salida de intensidad se acondicionarán de manera externa para convertir dicha señal de intensidad en una señal de tensión. Por lo tanto, resulta importante explicar, aunque sea de manera breve, los tipos de medida de tensión que existen para obtener datos de sensores.

Aunque muchos sensores producen voltajes de CC (Corriente continua) medibles con un dispositivo de adquisición de datos, la preocupación principal de este apartado consiste en examinar mediciones generales de CC que no involucran la configuración de un sensor como intermediario.



Para comprender cómo medir el voltaje, resulta esencial entender los fundamentos acerca de cómo realizar dicha medición. Esencialmente, el voltaje es la diferencia del potencial eléctrico entre dos puntos de interés en un circuito eléctrico. Sin embargo, un punto común de confusión es cómo determinar el punto de referencia para la medición. El punto de referencia para la medición es el nivel de voltaje al cual la medición es referenciada.

Esencialmente existen dos métodos para medir voltajes: referencia a tierra y diferencial.

3.7.1. Medición de Voltaje por Medio de Referencia a Tierra

Este método consiste en medir el voltaje con respecto a un punto común, normalmente denominado “tierra”. Con frecuencia esta “tierra” es estable o no cambia y se encuentra comúnmente cercana a los 0 V.

Se puede utilizar conexiones de entrada referenciadas a tierra para cualquier canal que cumpla con las siguientes condiciones:

- La señal de entrada es de alto nivel (mayor a 1 V).
- La señal de entrada puede compartir un punto de referencia común con otras señales.

La referencia a tierra es provista por el dispositivo que toma la medición o bien, por la señal externa medida. Cuando la tierra es proporcionada por el dispositivo, la configuración se denomina modo de salida sencilla referenciada a tierra (RSE), y cuando la tierra es proporcionada por la señal, la configuración se llama modo de salida sencilla no referenciada (NRSE).

La mayoría de los instrumentos ofrecen configuraciones similares en sus pines para las mediciones de entrada analógica. En la figura 15 se demuestra este tipo de medición utilizando un chasis NI CompactDAQ y un módulo de entrada analógica NI 9205.



Figura 15. Chasis NI CompactDAQ y Módulo de Entrada Analógica NI 9205

La Figura 16 muestra el diagrama de conexión para las mediciones de voltaje RSE utilizando el NI 9205 así como las salidas de los pines para el módulo. En la Figura 2, el Pin 1 corresponde al canal de “Entrada Analógica 0” (AI0) y el Pin 17 corresponde a la tierra común.

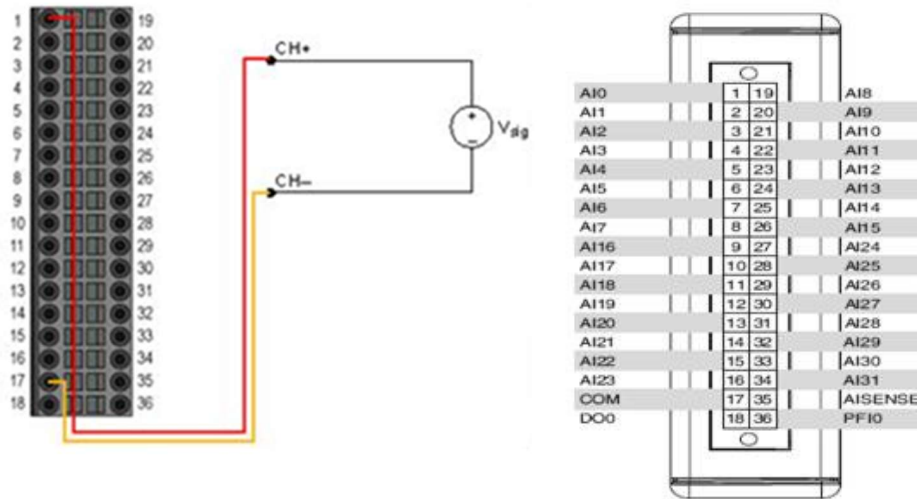


Figura 16. Modo de Salida Sencilla Referenciado a Tierra

La Figura 17 muestra el diagrama de conexión para las mediciones de voltaje NRSE utilizando el NI 9205. En la figura, el Pin 1 corresponde al canal de “Entrada Analógica 0” y el Pin 35 corresponde al canal de “AISENSE”. Este canal, específico para mediciones NRSE, puede detectar el voltaje a tierra proporcionado por la señal.

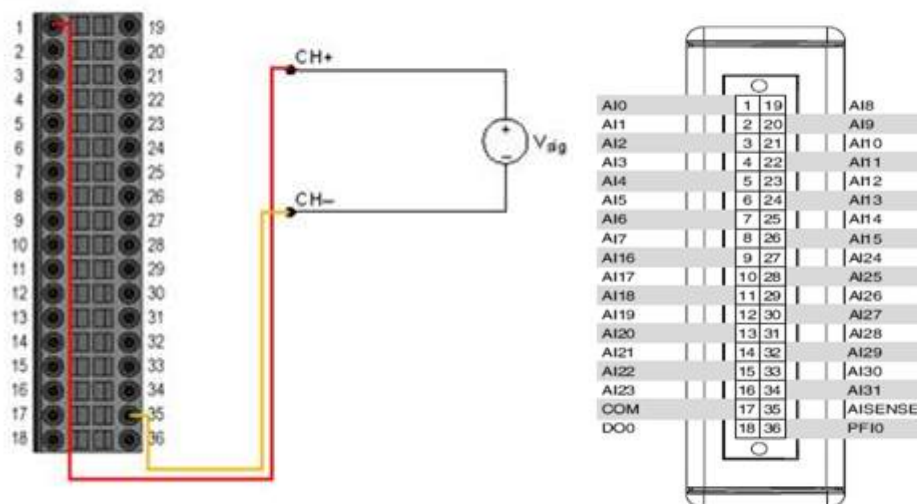


Figura 17. Modo de Salida Sencillo No Referenciado

3.7.2. Medición de voltaje por medio diferencial.

El otro método para medir el voltaje consiste en determinar en un circuito eléctrico el voltaje “diferencial” entre dos puntos. Por ejemplo, para medir el voltaje a través de un elemento sencillo, se puede medir el voltaje en ambos extremos del. La diferencia entre los dos voltajes es el voltaje a través del elemento. Normalmente, las mediciones de voltaje diferencial son útiles para determinar el voltaje que existe a través de los elementos individuales de un circuito, o si las fuentes de la señal son ruidosas.

Se puede utilizar conexiones de entrada diferencial para cualquier canal que cumpla con las siguientes condiciones:

- La señal de entrada es de bajo nivel (menor a 1 V).
- La señal de entrada requiere un punto de referencia a tierra separado o una señal de retorno.
- La señal viaja a través de ambientes ruidosos.

La figura 18 ilustra el diagrama de conexión para mediciones de voltaje diferencial utilizando un NI 9205. En la figura, el Pin 1 corresponde al canal de “Entrada Analógica 0” y el Pin 19 corresponde al canal de “Entrada Analógica 8”.

En modo diferencial, la señal negativa es cableada directamente al pin analógico de frente con el canal analógico conectado a la señal positiva. Por ejemplo, la “Entrada Analógica 0” estaría conectada a la señal positiva y la “Entrada Analógica 8” estaría conectada a la señal negativa, la “Entrada Analógica 1” para la positiva y la “Entrada Analógica 9” para la negativa y así sucesivamente. La desventaja que presenta el modo diferencial es que reduce efectivamente el número de canales de medición de entrada analógica a la mitad. [19]

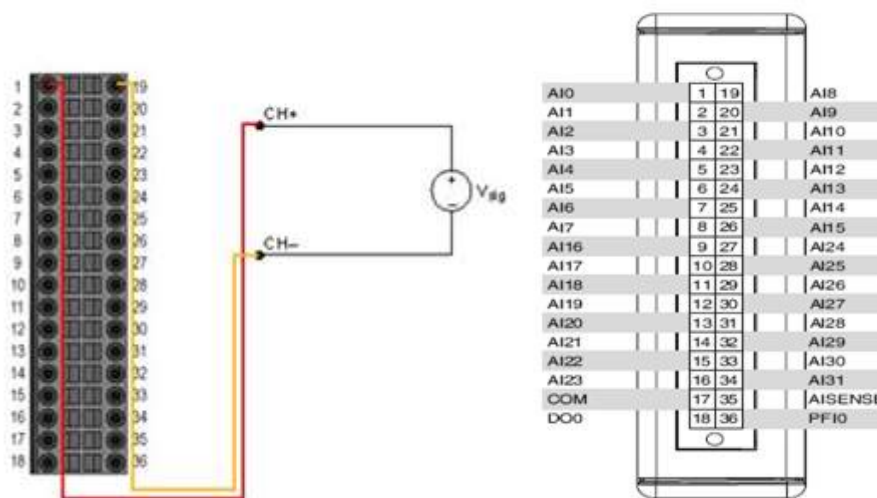


Figura 18. Modo Diferencial



Capítulo 4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

En los siguientes párrafos se describirá con adecuada precisión todos los componentes y partes de las que dispone la instalación de este proyecto. Se encuentra ubicada en la primera planta del ELDI (Edificio de Laboratorios, Docencia e Investigación) en el laboratorio de sistemas térmicos de evaporación y condensación de la Universidad Politécnica de Cartagena.

El propósito de dicha instalación es la medida del coeficiente de transmisión de calor y la caída de presión en ensayos de condensación de distintos tipos de refrigerantes en el interior de un tubo multipuerto extruido en aluminio con mini-canales de geometría triangular o rectangular.

4.1. Instalación experimental

El esquema completo de la instalación se puede ver en la figura 20. Se encuentra formada por un lazo principal que trasiega refrigerante, o el fluido que se quiera estudiar, y tres lazos secundarios, siendo dos de ellos de agua de refrigeración y el tercero de agua de evaporación. El lazo principal cuenta con tubería de cobre de $\frac{1}{2}$ pulgada (12.7 mm) y de 1 mm de espesor debido a los requerimientos de presión a los que estará sometida, mientras que el resto de lazos, al trasegar agua, están conformados de tubería de polibutileno de 22 mm de diámetro.

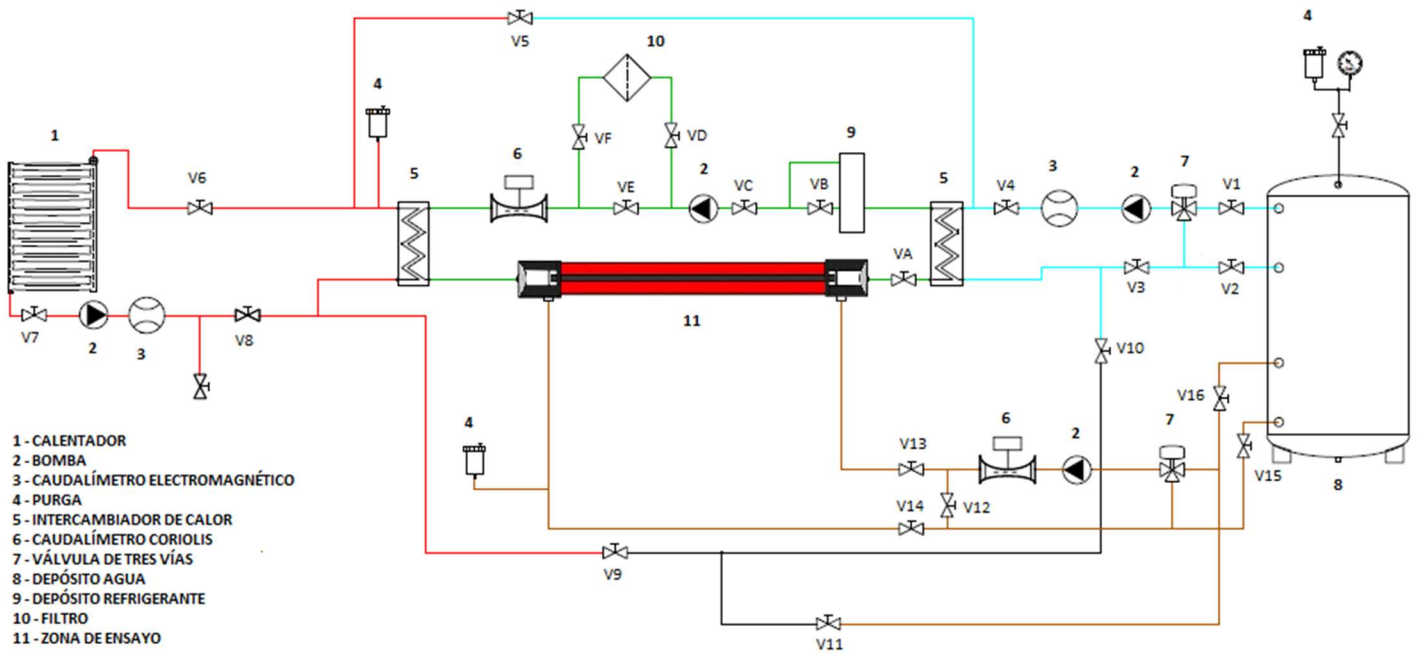


Figura 20. Esquema completo de la instalación.

4.1.1. Lazo principal

El lazo principal, resaltado en color verde en el esquema de la figura 20, es por el que circula el fluido de estudio. El refrigerante sub enfriado sale del depósito succionado por una bomba de engranajes controlada mediante un variador de frecuencia conectado a ella. Después de la bomba existe una bifurcación que cuenta con una línea sin ningún elemento y otra línea con un filtro. Si se obtuvieran niveles de humedad dentro del refrigerante, para eso existen dos medidores de humedad a la salida del depósito, sería obligado hacerlo circular por el filtro para retirar dicha humedad que afectaría negativamente a la obtención resultados. El fluido de trabajo atraviesa entonces un caudalímetro Coriolis, donde se puede medir con precisión el caudal, tras lo cual llega al intercambiador de placas que se encuentra conectado al circuito de evaporación, en el cual se evapora total o parcialmente el refrigerante antes de entrar en la zona de ensayo, controlando de esta manera el título de vapor.

La temperatura del refrigerante a la entrada del evaporador se realiza con un sensor de temperatura resistivo (RTD). Después de pasar por el evaporador la mezcla bifásica fluye por un tubo de cobre de diez centímetros de longitud hasta el colector de entrada. Se asume que se alcanza una mezcla bifásica uniforme antes de entrar en la zona de ensayo.



Entonces el refrigerante entra en la sección de ensayo. Dicha sección está compuesta por un tubo multipuerto extruido en aluminio con mini-canales de geometría rectangular, encerrado en una camisa por la que circula agua fría en contracorriente, que proviene del lazo de refrigeración primario, con el objetivo de retirar la cantidad de energía adecuada para conseguir la condensación total o parcial del refrigerante. La temperatura de la pared de ensayo se mide mediante nueve termopares soldados directamente a esta. Además, tiene otros dos termopares extra a la entrada y salida que sirven de comprobación. También cuenta con dos RTDs a la entrada y salida de la sección. La caída de presión a lo largo de la sección de ensayo es medida mediante un sensor de presión diferencial que toma datos de la entrada y la salida. La presión absoluta del refrigerante a la entrada, que se trata de un dato esencial pues caracteriza el proceso junto con el título de vapor y el gasto másico de refrigerante, es medida mediante otro sensor de presión.

Después de atravesar la sección de ensayo el fluido en estado de mezcla líquido-vapor o de líquido subenfriado es enviado a otro intercambiador de placas, conectado al circuito de refrigeración secundario o circuito de condensación, donde es totalmente condensado y/o enfriado hasta una temperatura que garantice la estabilidad del sistema. Es mediante este intercambio de energía por el cual se controla la presión de todo el circuito de ensayo, que como se ha dicho es una variable de control esencial. Lo ideal es mantener la entrada de la sección de ensayo y su salida casi a la misma presión constantemente, y sin que haya mucha diferencia entre ellas. Esto se consigue manteniendo el régimen de la bomba de refrigerante constante y realizando el intercambio de calor necesario en el intercambiador del circuito de refrigeración secundario, compensando de esta manera las pérdidas de presión que se producen. Finalmente, el fluido es devuelto al depósito inicial donde se repite el proceso. En dicho depósito hay instalado otro sensor de presión. Por lo tanto, existen tres variables de control directo para el correcto funcionamiento de un ensayo, que son: la presión a la entrada de la sección de ensayo, monitorizada mediante el sensor de presión y controlada como se ha explicado antes, el caudal de agua que llega al evaporador, monitorizado por un caudalímetro electromagnético y es controlado mediante la bomba de ese circuito y su variador de frecuencia, y finalmente el caudal de refrigerante que se monitoriza mediante el caudalímetro coriolis y se controla con la bomba de engranajes y su variador de frecuencia.



4.1.2. Lazo de refrigeración primario

El lazo de refrigeración principal, resaltado en marrón en el esquema de la figura 20, es por el que circula el fluido calo-portador, en este caso agua, encargado de retirar la energía necesaria de la sección de ensayo para conseguir la condensación total o parcial del refrigerante.

El agua sale del depósito succionada por una bomba circuladora de bajo caudal. La temperatura a la entrada de la bomba es obtenida mediante otra RTD. Antes de atravesar dicha bomba el agua se encuentra con una válvula motorizada de tres vías (o actuador de control modulante) conectada a un PID. Mediante esta válvula se asegura una temperatura constante de agua fría a la entrada de la camisa de la sección de ensayo.

Tras atravesar la bomba el agua pasa a través del segundo caudalímetro coriolis para, después, llegar a la sección de ensayo. Tanto a la salida como a la entrada de la camisa, el circuito cuenta con RTDs duplicadas. Esta disposición de sensores existe por un motivo en particular, de manera que el sensor más cercano a la camisa es utilizado para obtención de datos de temperatura directos, mientras que el sensor más alejado lo utilizamos para la obtención de datos de control. Este método de duplicación de sensores es repetido en el resto de lazos secundarios y se explicará con más detalle en el apartado 4.2.3.

Tras extraer el calor necesario, el agua de refrigeración es devuelta al depósito donde reinicia su ciclo. Interesa en este circuito que el caudal de agua sea constante. Esto se consigue manteniendo el régimen de la bomba constante, razón por la cual no necesita un variador de frecuencia como el resto de bombas, la acción de la válvula de 3 vías controlada por el PID, y la monitorización del caudalímetro coriolis.

4.1.3. Lazo de refrigeración secundario

El lazo de refrigeración secundario, resaltado en azul en el esquema de la figura 1, trasiega agua y está conectado al mismo depósito que el lazo de refrigeración primario. Para garantizar la presión en el depósito y para absorber el calor suministrado por el refrigerante al agua, se emplea una enfriadora de 4 kW (no representada en el esquema). El objetivo principal de este lazo es la retirada de energía calorífica del refrigerante en el intercambiador de condensación, y de manera indirecta, el control de la presión del circuito de ensayo, como se ha explicado anteriormente.



Este lazo cuenta, al igual que el lazo de refrigeración primario, con una válvula motorizada de tres vías conectada a un PID, una bomba de circulación de bajo caudal con su variador de frecuencia conectado a ella y una RTD a la entrada de la misma. Tras atravesar la bomba, el agua se encuentra con un caudalímetro electromagnético y después el agua fluye hasta el intercambiador, que trabaja con el agua y el refrigerante en contracorriente. A la entrada y a la salida de dicho intercambiador se tienen RTDs duplicadas e instaladas de la misma manera que en el lazo de refrigeración primario. Tras pasar por el intercambiador el agua vuelve al depósito para reiniciar su ciclo.

4.1.4. Lazo de evaporación

El lazo de evaporación, resaltado en rojo en el esquema de la figura 20 trasiega agua al igual que los otros dos lazos secundarios. El objetivo principal de este lazo es el de suministrar energía suficiente para conseguir la evaporación total o parcial del fluido de estudio.

Este lazo cuenta con un calentador eléctrico mediante resistencia de inmersión que se encarga de suministrar energía al agua que utilizaremos para evaporar el refrigerante. La cantidad de calor que se debe suministrar con dicho calentador se encuentra controlada mediante la conexión de un PID y los datos de control necesarios se obtienen de una RTD conectada a la salida. Esta variable, es decir la temperatura del agua de evaporación, o más bien, la potencia que debe suministrar el calentador, junto con las variables controladas mediante las válvulas de 3 vías de los circuitos de refrigeración, tanto primario como secundario, conforman las variables auxiliares de la instalación. Estas variables no son de control directo, pero son necesarias para mantener la estabilidad de los ensayos sin que se produzcan, por ejemplo, fluctuaciones de temperatura. Además, también interesa controlar estas variables mediante PID comerciales por cuestiones de seguridad.

El agua abandona el calentador succionada por la bomba de circulación controlada por un variador de frecuencia, y después se encuentra con un caudalímetro electromagnético para terminar llegando al intercambiador de placas de evaporación, que al igual que el de condensación opera en contracorriente, pero en este caso para evaporar total o parcialmente el refrigerante. Después el agua vuelve al calentador donde el proceso se reinicia. De igual manera que los lazos de refrigeración primario y secundario, a la entrada y salida del intercambiador de calor contamos con la instalación de RTDs duplicadas para la obtención de datos de temperatura.

Este lazo cuenta con una purga antes del calentador con el objetivo de eliminar las acumulaciones de burbujas de aire.



Como se puede apreciar en el esquema de la figura 20, el lazo de evaporación está conectado mediante varias bifurcaciones a los otros dos lazos secundarios. Esto ocurre por dos razones. La primera es la necesidad de una disposición adecuada para el llenado de agua de la instalación, por ello se tiene una conexión hidráulica entre el lazo de evaporación y el lazo de refrigeración secundario. La segunda es por motivos de precisión instrumental. Con el uso continuado de los aparatos es posible que se acumule en las paredes de los caudalímetros electromagnéticos partículas de suciedad. Debido al proceso de medida que utiliza este tipo de sensor, una acumulación importante de dichas partículas puede hacer que los datos obtenidos no sean del todo precisos. Por ello, para controlar que los datos obtenidos son adecuados, se conectan en serie los dos caudalímetros electromagnéticos y el caudalímetro coriolis del lazo de refrigeración primario, que no se ve afectado por el problema anteriormente mencionado. De esta manera podemos comprobar que todos los caudalímetros dan el mismo valor y por lo tanto no hay ningún problema, o por el contrario se obtienen medidas distintas lo que indicaría que los caudalímetros electromagnéticos deben ser limpiados o calibrados en consecuencia.

Para conseguir la conexión en serie de los caudalímetros se debe permitir el paso de fluido por las válvulas 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12 y 15, manteniendo el resto cerradas. Las válvulas de tres vías deben permitir el paso de fluido únicamente en el sentido que indican las bombas sin mezclar fluido de otras líneas de manera que la válvula de tres vías del circuito de refrigeración secundario permitiría el paso de fluido en la línea de las válvulas 1 y 4, pero no de la línea con las válvulas 2 y 3 que permanecerían cerradas. La válvula de tres vías del circuito de refrigeración primario se conectaría de igual manera permitiendo el paso de fluido en la línea de las válvulas 16 y 12, pero sin permitir la mezcla de fluido con la línea de la válvula 15.

4.2. Sección de ensayo

La sección de ensayo está compuesta por un tubo multipuerto de minicanales extruido en aluminio con una longitud total de 306 mm, siendo la longitud de medida del proceso de condensación de 259 mm. Cuenta con dos zonas adiabáticas a la entrada y a la salida de una longitud de 23.5 mm cada una. Las características específicas se encuentran en la tabla 3. En la figura 21 se puede observar la sección transversal del tubo, incluyendo la camisa exterior por la que circula el agua de refrigeración. El tubo multipuerto fue proporcionado por Modine Manufacturing Company[®]. Para medir la temperatura de la pared de la sección de ensayo se utilizan un total de nueve termopares soldados a dicha pared. La geometría de la sección fue medida por un microscopio óptico consiguiendo medidas precisas de las áreas y perímetros exteriores e interiores. La rugosidad de la superficie se obtuvo mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM).

Geometría del tubo	Área de flujo	Perímetro exterior	Perímetro interior	Puertos	Diámetro hidráulico	Rugosidad	RR
Puertos rectangulares	12.54 mm ²	40.17 mm	43.22	10	1.16 mm	0.266 μm	3.89*10 ⁻⁴

Tabla 3. Características del tubo.

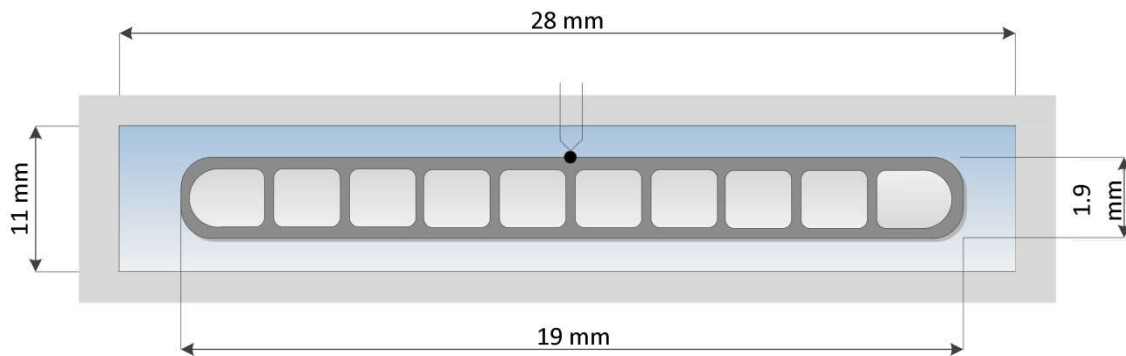


Figura 21. Geometría del tubo de estudio y la camisa exterior.

4.3. Sensores

Para poder caracterizar los fenómenos físicos que acontecen en la instalación experimental es necesario disponer de distintos instrumentos de medida. En el anterior punto se ha descrito los componentes que forman la instalación de manera general. En este apartado se recopilan todas las características técnicas de la instrumentación, sensores y actuadores. La figura 22 muestra el mismo esquema que el de la figura 20 pero resaltando, en este caso, la posición de los sensores, y sin contar con las válvulas de tubería de cobre por comodidad de visualización. La numeración de las RTD se explicará más adelante en el punto 4.3.3.

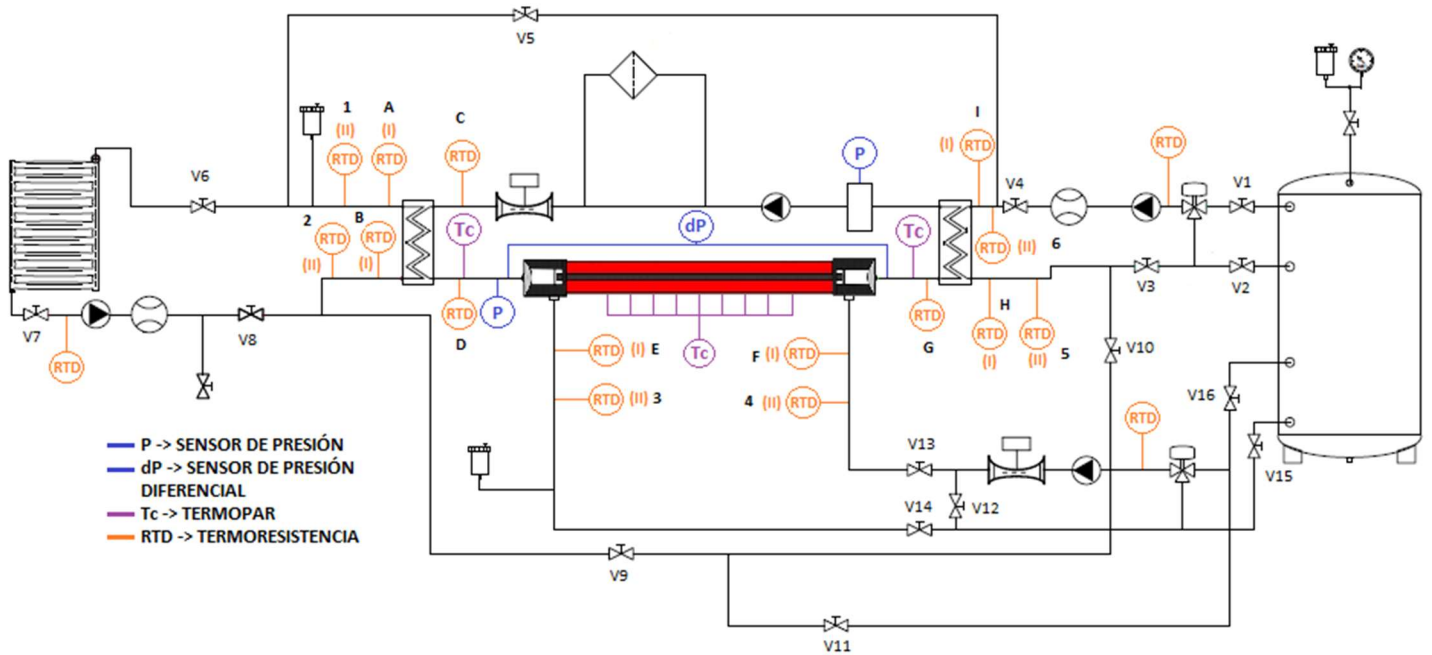


Figura 22. Esquema de sensores.

4.3.1. Caudalímetros

Se dispone de cuatro caudalímetros en total. Dos caudalímetros de efecto Coriolis para obtener el gasto másico de refrigerante del lazo principal y del agua del lazo de refrigeración primario, y dos caudalímetros electromagnéticos para obtener los gastos másicos del lazo de refrigeración secundario y del lazo de evaporación.

El Coriolis Elite CMFS010M se encuentra instalado en el lazo de principal y en el lazo de refrigeración primario está instalado el Coriolis Elite CMF025. Por sus características particulares estos caudalímetros nos permiten obtener, además del gasto másico, la densidad del fluido que están trasegando. Las especificaciones de estos caudalímetros están reflejadas en la tabla 4. Cada uno de los Coriolis está conectado a un transmisor de señal Emerson Micro Motion Transmitter 2700 cuyas especificaciones están en la tabla 5.



Designación	Coriolis Elite CMFS010M	Coriolis Elite CMF025
Fluido medido	Refrigerante	Agua
Precisión de medida de caudal	$\pm 0.05\%$	$\pm 0.05\%$
Repetibilidad de medida de caudal	$\pm 0.025\%$	$\pm 0.025\%$
Precisión de medida de densidad	$\pm 0.2 \text{ kg/m}^3$	$\pm 0.2 \text{ kg/m}^3$
Repetibilidad de medida de densidad	$\pm 0.1 \text{ kg/m}^3$	$\pm 0.1 \text{ kg/m}^3$
Estabilidad de cero	0.002 kg/h	0.027 kg/h
Caudal máximo	108 kg/h	2180 kg/h
Salida	4 – 20 mA	4 – 20 mA

Tabla 4. Especificaciones técnicas de los Coriolis Elite.

Designación	Tecnología	Número de señales analógicas	Número señales en frecuencia	Variable primaria	Variable secundaria	Salida
Micro motiontransmitter 2700	MVD	2	1	Gasto másico (configurable)	Densidad (configurable)	4 – 20 mA

Tabla 5. Especificaciones Micro Motiontransmitter 2700.



Figura 23. De izquierda a derecha: Coriolis Elite CMFS010M, Coriolis Elite CMF025, Micro MotionTransmitter 2700.

Los caudalímetros electromagnéticos son modelo MAG1100Std y están conectados cada uno a un transmisor de señal modelo Transmitter MAG600. Para que el sensor nos de medidas correctas el flujo tiene que llegar a él totalmente desarrollado. Por ello la instalación de este tipo de caudalímetros debe realizarse de manera que se encuentre a una distancia aguas arriba de cinco veces el diámetro de la tubería utilizada y a tres veces el diámetro de la tubería aguas debajo de cualquier tipo de elemento que pueda perturbar el desarrollo del flujo como puede ser una bomba, codo, válvula etc. Las especificaciones técnicas se pueden apreciar en la tabla 6.

Designación	Fluido medido	Sensor	Transmisor	Precisión de medida de caudal	Salida
Caudalímetro electromagnético Siemens	Agua	MAG1100Std	MAG6000	±0.25%	4 – 20 mA

Tabla 6. Especificaciones técnicas del caudalímetro electromagnético.



Figura 24. De izquierda a derecha: MAG1100Std, Transmitter MAG6000.

4.3.2. Sensores de presión.

La instalación cuenta con tres sensores de presión Rosemount® 3051. Uno instalado a la entrada de la sección de ensayo para obtener la presión absoluta del refrigerante, otro instalado en el depósito de refrigerante para obtener la presión absoluta del mismo y finalmente, un sensor de presión diferencial instalado para obtener la caída de presión en la sección de ensayo. Las especificaciones técnicas se pueden apreciar en la tabla 7 y la posición de cada uno en el esquema de la figura 25.

Designación	Presión mínima (bar)	Presión máxima (bar)	Sobrepresión límite (bar)	Fuente de alimentación (V)	Salida	%Error de rango
Transmisor de presión absoluta	0	32	110	10.5 – 55 VCD	4 – 20 mA	<0.008
Transmisor de presión diferencial	0	1	250	10.5 – 55 VCD	4 – 20 mA	<0.009

Tabla 7. Especificaciones técnicas de los sensores de presión.



Figura 25. Rosemount® 3051.



4.3.3. Sensores de temperatura

Se tiene un total de 18 termoresistencias PT-100 clase B 1/10 DIN. Existen dos tipos de uso de estas termoresistencias siendo unas para la obtención de medidas de temperatura mientras que otras son usadas para el control de la instalación. Su posición está representada en el esquema de la figura 22.

Se tienen RTDs que obtienen datos de control a la entrada y salida del intercambiador del circuito de evaporación, en la entrada y salida del intercambiador del circuito de refrigeración secundario y a la entrada y salida de la sección de ensayo del circuito de refrigeración primario. En total 6 RTDs de control, ordenadas en el esquema de la figura 22 de 1 a 6. El resto de termoresistencias numeradas se utilizan para obtener datos de medida. Su ubicación es la siguiente: en la salida del caudalímetro de efecto Coriolis de la sección de ensayo, a la entrada y salida de dicha sección, en las entradas y salidas de los intercambiadores de los lazos secundarios y en la entrada y salida de la sección de ensayo del circuito de refrigeración primario. En total 9, ordenadas en la figura 22 de la A a la I.

Las tres RTDs que no tienen numeración son las que se encuentran a la entrada de las bombas de las secciones secundarias. Estas no aparecen numeradas porque su conexión no se lleva ni al elemento de adquisición de datos ni al de control de la instalación. Cada una de estas RTDs está conectada a un PID. Mediante los datos de estas RTD y el PID se controlan las variables que se denominaron auxiliares en el punto 4.1.4.

Como se habrá podido apreciar en varios puntos de la instalación existen RTDs instaladas en el mismo punto, pero siendo unas para obtención directa de datos y otras para el control, siendo las primeras indicadas con un (I) y las segundas con un (II) en el esquema de la figura 22. Este tipo de instalación tiene dos razones de ser. Para el análisis del proceso de condensación en la sección de ensayo se necesitan unas medidas de temperatura lo más precisas posibles, por lo tanto, es muy importante colocar los sensores tan cerca al punto del que se desee obtener dichas medidas como físicamente se pueda. Sin embargo, en estas zonas el flujo de fluido es más inestable y más si se ha podido producir un cambio de fase. Por ello los datos obtenidos mediante el sensor más próximo al punto que se quiere medir son datos de medida que van directamente al Data Logger (se explicará más adelante), mientras que las sondas que se encuentran más alejadas a este punto están destinadas a la obtención de datos de control. Este error de posición respecto a la medida real no supone un problema pues se puede corregir en el control. Las sondas utilizadas para el control son menos precisas que las utilizadas para la obtención de datos de medida. Esto viene reflejado en el tipo de conexión.

La otra razón por la que esta conexión de sensores ocurre de esta manera es el hecho de no poder usar la misma sonda para dos propósitos distintos. Para medir la temperatura los aparatos conectados a las RTD inyectan una pequeña cantidad de intensidad de corriente, de pocos miliamperios, y miden la caída de tensión en el sensor. Por ello si se conecta a varios aparatos a una sola RTD todos inyectan una cantidad de corriente y por lo tanto la medida de la caída de tensión sería errónea, pues sería la caída de tensión de todas las intensidades.

Las RTD de control de los intercambiadores y del lazo de refrigeración se conectan mediante tres hilos a unos acondicionadores de señal, que serán explicados más adelante, mientras que las RTDs a la entrada de las bombas se conectan directamente a los PID, también mediante tres hilos.

Las RTD de medida se conectan todas mediante cuatro cables al registrador de datos, cuestión que también será explicada más adelante.

Las especificaciones técnicas de las RTD se pueden apreciar en la tabla 8.

Designación	Dimensiones	Material de la vaina	Número de hilos	Error máximo
RTD PT-100 B 1/10 DIN	3x70mm	Acero inoxidable	4	$0.03+0.0005*T(^{\circ}C)$

Tabla 8. Características de las termorresistencias.



Figura 26. PT-100.

Además de las RTD, se tienen instalados un total de once termopares de dos hilos en la sección de ensayo, de manera que hay nueve soldados directamente en la pared exterior superior del tubo multipuerto con la disposición mostrada en la figura 27 (indicados con la letra T), con los que se obtienen medidas de temperatura de la pared durante todo el proceso de condensación del refrigerante y los otros dos soldados antes y después de la sección de ensayo. Estos dos últimos termopares están conectados de manera redundante. A la entrada y a la salida de la sección de ensayo se tienen dos RTD y los sensores de presión. Con esto obtenemos la temperatura de saturación y la presión, datos suficientes para caracterizar el estado en esos puntos. Además, las RTD son sensores más precisos que los termopares. Por lo tanto, estos termopares nos dan la temperatura de la pared a la entrada y la salida de la sección de ensayo, pero son sólo datos que sirven de comprobación.

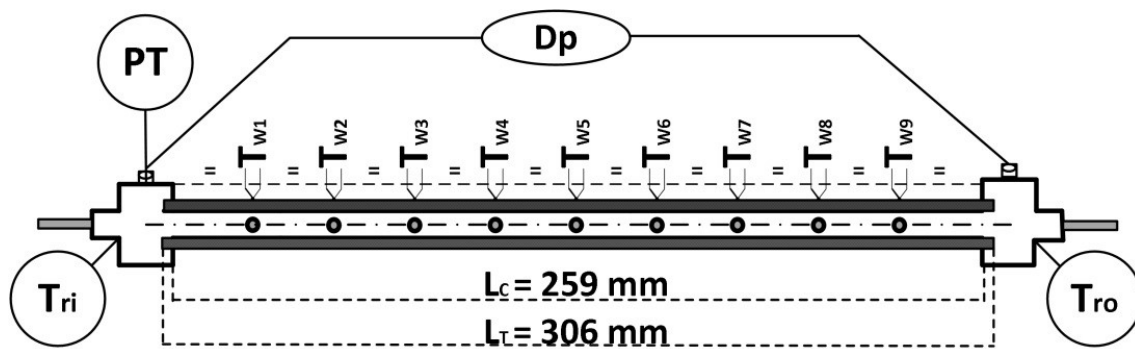


Figura 27. Localización de termopares. [2]

4.4. Actuadores y controladores

4.4.1. Variadores de frecuencia

La instalación cuenta con tres variadores de frecuencia VS mini J7 para controlar la velocidad de rotación de tres bombas y así controlar los parámetros necesarios. Con la rotación de la bomba de engranajes logramos el caudal másico de refrigerante deseado. Con la bomba del lazo de evaporación controlamos la temperatura a la entrada de la sección de ensayo. Y finalmente con la bomba del lazo de refrigeración secundario controlamos la temperatura del agua de condensación. Cabe destacar que estos variadores no son los únicos elementos de control, sino que actúan en conjunto con los PID y los actuadores de control modulante (explicados más adelante) para mantener un control total de las variables que se desean controlar, como se explicó en puntos anteriores. El variador de la sección de ensayo y el del lazo de evaporación comparten el mismo modelo, mientras que el de la bomba del lazo de refrigeración secundario es un modelo ligeramente distinto. Sus especificaciones técnicas se muestran en la tabla 9.

Denominación	CIMR-J7AZBOP2	CIMR-J7AZBOP4
Alimentación	200 – 240 V.c.a a 50/60 Hz	200 – 240 V.c.a a 50/60 Hz
Capacidad de fuente de alimentación (kVA)	0.9	1.6
Capacidad máxima aplicable del motor (kW)	0.2	0.4
Rango de control de frecuencia	0.1 a 400 Hz	0.1 a 400 Hz
Precisión de frecuencia con temperatura	Comandos analógicos: $\pm 0,5\%$ ($25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$)	Comandos analógicos: $\pm 0,5\%$ ($25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$)
Resolución de configuración de frecuencia	Comandos analógicos: 0,06 Hz/60 Hz (equivalente a 1/1.000)	Comandos analógicos: 0,06 Hz/60 Hz (equivalente a 1/1.000)
Resolución de frecuencia de salida	0,01 Hz	0,01 Hz

Tabla 9. Características de los variadores de frecuencia.



Figura 28. Variador de frecuencia VS mini J7.

4.4.2. Actuadores de control modulante

Se dispone de dos actuadores de control modulante AME 30 gobernados por un PID cada uno. Comúnmente llamados válvulas motorizadas de tres vías, con ellas se controlan dos de las tres variables auxiliares de la instalación como se explicó en el punto 4.1.4, eliminando las fluctuaciones de temperatura que podrían producirse. Las especificaciones técnicas pueden verse en la tabla 10.

Denominación	Alimentación	Fuerza máxima	Velocidad del eje	Temperatura máxima del medio dentro de la tubería
AME 30	24 V	450N	3s/mm	150 °C

Tabla 10. Características de actuadores AME.



Figura 29. Actuador AME 30.

4.4.3. Controladores PID

Como se ha explicado antes, la instalación cuenta con una serie de controladores PID (Proporcional, Integral, derivativo) comerciales de la marca Watlow para gobernar los circuitos secundarios. Dos de ellos están instalados para controlar las válvulas de tres vías de los dos lazos de refrigeración, mientras que el tercero está instalado en el calentador eléctrico del lazo de evaporación con el objetivo de controlar la cantidad de calor que proporciona al agua del evaporador. Cabe destacar que el PID conectado al calentador cuenta con un sistema de protección para fallos eléctricos compuesto por la conexión al controlador de un relé y un controlador de potencia Watlow DYN-a-rite®. Las características de los controladores aparecen en la tabla 11.

Designación	Bucles de control	Alarmas	Máximo de salida	Configuraciones de fase	Protocolos de comunicación
EZ-ZONE®PM Express	1	2	15 A	1	Bus estándar

Tabla 11. Características de los PID.



Figura 30. De izquierda a derecha: Watlow DIN-a-mite®, EZ-ZONE®PM Express.

Además de los PID comerciales existen otros cuatro PID programados en LabView encargados de controlar el gasto másico de refrigerante, la presión de todo el sistema, el gasto másico de agua y el intercambio de calor en el evaporador para controlar el título de vapor de este último.

4.5. Bombas

Para hacer circular los distintos fluidos de la instalación se cuenta con un total de cuatro bombas distribuidas por los distintos lazos, siendo dos de ellas bombas de circulación de bajo caudal Roca SB-5Y instaladas en el circuito de refrigeración primario y en el circuito de evaporación, otra bomba de circulación de bajo caudal pero de una mayor potencia Grundfos UP 20-45 instalada en el circuito de refrigeración secundario y una bomba de engranajes Micropump encargada de impulsar el refrigerante en el circuito principal. Las características de estas bombas se recogen en las siguientes tablas.

Denominación	Tensión monofásica	Velocidad posición	Intensidad nominal	Potencia	Velocidad r.p.m
SB-5Y	230 V	1	0.15 A	30 W	1850

Tabla 12. Características bomba Roca SB-5Y.

Denominación	Tensión monofásica	Intensidad nominal	Potencia	Velocidad posición
UP 20-40 N	230 V	0.50 A	115 W	1

Tabla 13. Características bomba Grundfos UP 20-40 N.

Denominación	Tensión	Intensidad nominal	Potencia	Velocidad r.p.m	Cos Φ
RL71B	230 V/ 400 V	2.26 A	0.37 kW	1370	0.77

Tabla 14. Características bomba Micropump.



Figura 31. De izquierda a derecha: Grundfos UP 20-40 N, Roca SB-5Y, Micropump RL71B.

4.6. Sistema de adquisición de datos

Las señales obtenidas por los distintos sensores y elementos de medida del sistema son recibidas por un multímetro de Agilent Technologies, modelo 34970A con tres módulos multiplexores de 22 canales modelo 34901A. Este elemento registra datos de los caudalímetros, tanto de efecto Coriolis como los electromagnéticos, de los sensores de presión y de las RTD de adquisición de datos (4 hilos). Con un ordenador personal y el software Benchlink Data Logger v3, proporcionado por el fabricante, registramos el valor de las señales, conectando el multímetro mediante USB. Una serie de especificaciones generales se puede observar en la tabla 15, aunque es recomendable recurrir al manual de características del aparato. También se puede apreciar en la figura 32 el multímetro y las tarjetas multiplexoras.

Designación	Tipo	Tensión máx.	Intensidad máx.	Ancho de banda
34970A módulo multifunción	2 puertos I/O digitales de 8 bits	42 V	400 mA	-
	Contador de eventos de 26 bits	42 V	-	100 kHz
	2 salidas analógicas de 16 bits	± 12 V	10 mA	DC

Tabla 15. Características Agilent 34970A.



Figura 32. De izquierda a derecha: Agilent 34970A, módulo multiplexor 34901A.

El control de la instalación está especialmente programado con el software LabVIEW y utiliza una tarjeta de National Instruments modelo NI-PCI 6229 instalada en un ordenador personal, usando sus entradas y salidas analógicas, para la adquisición de datos. Las características de esta tarjeta se pueden observar en la tabla 16. Por razones que se explicarán más adelante, la conexión de elementos a esta tarjeta primero requiere de unos acondicionadores de señal, cuyas características pueden apreciarse en la tabla 17.

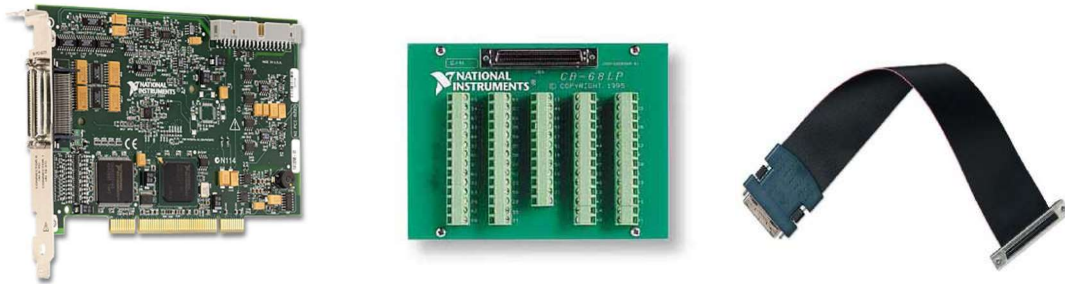


Figura 33. De izquierda a derecha: Tarjeta NI-PCI 6229, bus de datos, Cable de conexión.



Fabricante	National Instruments	Rango máximo de voltaje en entrada	-10...10 V
Modelo	NI-PCI 6229	Exactitud de rango	3100 μ V
Serie	M	Sensibilidad de rango	97.6 μ V
Entradas analógicas	32 (Modo común)/16 (Modo diferencial)	Rango mínimo de voltaje en entrada	-200...200 mV
Salidas analógicas	4	Exactitud de rango	112 μ V
Frecuencia máxima de muestreo	250 kHz	Sensibilidad de rango	5.2 μ V
Muestreo simultáneo	No	Número de rangos de entrada	4
Memoria de la tarjeta	4095 muestras	Entradas digitales	48
Resolución	16 bits	Rango	0...5 V

Tabla 16. Características tarjeta NI-PCI 6229

Designación	Salida	Deriva en cero	Deriva en rango	Linealización
Acondicionador TDSTD	4 – 20 mA	$\pm 0.025\%/^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.010\%/^{\circ}\text{C}$	0.1%

Tabla 17. Características de los acondicionadores.



Figura 34. Acondicionador de señal.

4.6.1. Conexiones y canales de las tarjetas multiplexoras.

Cada tarjeta multiplexora cuenta con un total de veintidós canales disponibles para la conexión de los sensores. Cada canal permite la conexión de dos cables. Veinte de esos canales operan con tensión, es decir miden los datos obtenidos por los sensores mediante una diferencia de tensión, mientras que los dos canales restantes procesan la información mediante medidas de intensidad. Esto es importante a la hora de conectar los distintos sensores de la instalación pues algunos operan con tensiones y otros con intensidades. La manera de conectarlos es la siguiente:

- RTDs: Las RTDs tienen un total de 4 hilos. Por ello cada una ocupa dos canales de tarjeta. En uno de los canales se conectan dos cables a modo de alimentación y en otro los dos cables de datos. Esta disposición se puede ver en la figura 6, en la que se ha resaltado la conexión de la RTD que ocupa los canales 104 y 114. De esta manera cada RTD tiene su conexión en los canales con la misma terminación numérica, es decir, una RTD ocuparía el canal 101 y el 111, el 102 y el 112 etc. Los canales se pueden ver en las tablas 18, 19 y 20. La nomenclatura hace referencia a la definición de las variables en la programación de LabVIEW. Las RTDs están conectadas a la primera y segunda tarjeta multiplexora.



Número	Canal	Sensor	Nomenclatura
1	101	RTD C	TREFEVAP_in
2	102	RTD F	TWST_in
3	103	RTD E	TWST_out
4	104	RTD G	TREFoutst
5	105	No se usa	
6	106	RTD I	TWPC_in
7	107	RTD H	TWPC_out
8	108	No se usa	
9	109	No se usa	
10	110	No se usa	
11	111	RTD C	TREFEVAP_in
12	112	RTD F	TWST_in
13	113	RTD E	TWST_out
14	114	RTD G	TREFoutst
15	115	No se usa	
16	116	RTD I	TWPC_in
17	117	RTD H	TWPC_out
18	118	No se usa	
19	119	No se usa	
20	120	No se usa	
21	121	No se usa	
22	122	No se usa	

Tabla 18. Canales tarjeta multiplexora 1.



Número	Canal	Sensor	Nomenclatura
1	201	RTD A	TCE
2	202	RTD B	TCS
3	203	Presión diferencial	Pdif
4	204	Presión de sección de ensayo	Pensy
5	205	Presión de depósito de refrigerante	Pdep
6	206	Coriolis sección de ensayo (Densidad)	rho_ref
7	207	Caudalímetro electromagnético (Caudal agua evaporación)	Caudal_vol_agua_caliente
8	208	Coriolis sección de ensayo (Caudal)	Dot_mref
9	209	RTD D	TREFinst
10	210	No se usa	
11	211	RTD A	TCE
12	212	RTD B	TCS
13	213	No se usa	
14	214	No se usa	
15	215	Caudalímetro electromagnético (Caudal agua condensación)	Caudal_condensador
16	216	No se usa	
17	217	Coriolis refrigeración primaria	dot_mwater
18	218	No se usa	
19	219	RTD D	TREFinst
20	220	No se usa	
21	221	No se usa	
22	222	No se usa	

Tabla 19. Canales tarjeta multiplexora 2.



Número	Canal	Sensor	Nomenclatura
1	301	Termopar 1	TC1
2	302	Termopar 2	TC2
3	303	Termopar 3	TC3
4	304	Termopar 4	TC4
5	305	Termopar 5	TC5
6	306	Termopar 6	TC6
7	307	Termopar 7	TC7
8	308	Termopar 8	TC8
9	309	Termopar 9	TC9
10	310	Termopar entrada sección ensayo	TC_header_in
11	311	Termopar salida sección ensayo	TC_header_out
12	312	No se usa	
13	313	No se usa	
14	314	No se usa	
15	315	No se usa	
16	316	No se usa	
17	317	No se usa	
18	318	No se usa	
19	319	No se usa	
20	320	No se usa	
21	321	No se usa	
22	322	No se usa	

Tabla 20. Canales tarjeta multiplexora 3.

4.6.2. Conexiones y canales de la tarjeta de adquisición de datos.

Como se ha explicado el control de la instalación se realiza mediante un ordenador que recibe datos de la tarjeta de adquisición. El vínculo entre la tarjeta y los sensores es el bus de datos. La particularidad de la tarjeta es que no puede recibir inyecciones de intensidad necesarias para realizar el cálculo interno de la diferencia de tensión que enviarían por ejemplo las RTDs. Es por ello que para conectar dichos dispositivos se requiere los acondicionadores de señal que se mencionaron antes. Estos acondicionadores lo que hacen es convertir la señal de las RTD en una señal de intensidad y a través de una resistencia añadida (como en las tarjetas multiplexoras) se mide la caída de tensión que esta señal de intensidad produce en la resistencia. Las RTDs se conectan a estos dispositivos mediante 3 hilos como se puede ver en la figura 37. La señal de salida de estos acondicionadores se conecta al bus de datos mediante dos cables. Existen dos placas de bus de datos, la C-0 y la C-1.

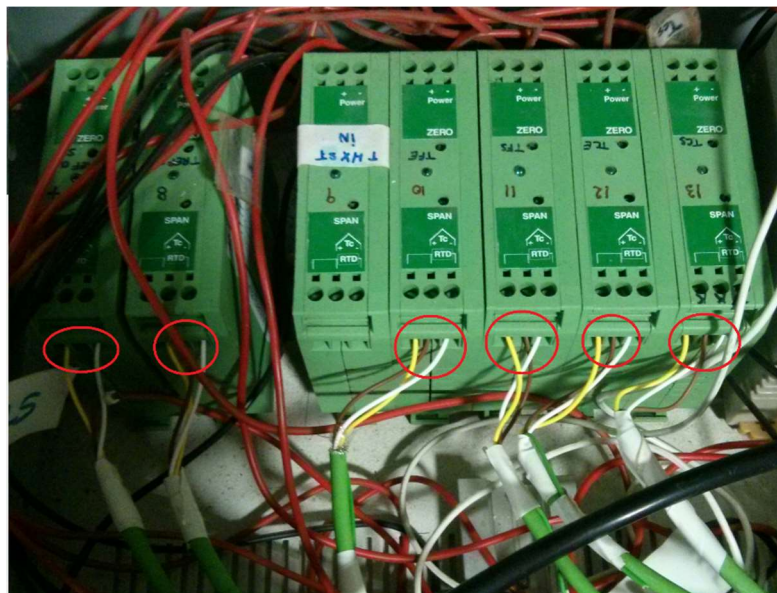


Figura 37. Conexión de RTD a acondicionadores de señal.

Por otro lado, los sensores que trabajan con señales de salida de intensidad vuelven a recibir el mismo tipo de conexión que tenían en las tarjetas multiplexoras, es decir, incluyen una resistencia calibrada para poder transformar dicha señal de intensidad en una de tensión, pero en este caso no pasan por los acondicionadores de señal como las RTD.

La conexión de sensores en el bus de datos se realiza utilizando únicamente los canales analógicos y el tipo de medida de tensión es diferencial. Los canales se asignan en intervalos de 8, es decir un sensor ocuparía el canal 0 y el 8, otro el 1 y el 9 etc. Los canales asignados a cada sensor aparecen en las tablas 21 y 22.



C-0					
Entradas analógicas (AI)		Canales		Sensor	Nomenclatura
0	8	68	34	Caudalímetro electromagnético circuito condensación	Caudal_condensador
1	9	33	66	RTD 4	TFE
2	10	65	31	RTD 3	TFS
3	11	30	63	RTD 1	TCE
4	12	28	61	RTD 2	TCS
5	13	60	26	Presión depósito refrigerante	PD
6	14	25	58	Presión entrada sección de ensayo	PENSY
7	15	57	23	Presión diferencial	PDIF

Tabla 22. Canales placa C-0



C-1					
Entradas analógicas (AI)		Canales		Sensor	Nomenclatura
16	24	68	34	Coriolis sección de ensayo (gasto másico)	MREFCOR
17	25	33	66	No se usa	
18	26	65	31	RTD 6	TCONDin
19	27	30	63	Coriolis circuito condensación (gasto másico)	MH2OCOR
20	28	28	61	No se usa	
21	29	60	26	No se usa	
22	30	25	58	RTD 5	TCONDout
23	31	57	23	Caudalímetro electromagnético circuito evaporación	SIEMENS

Tabla 23. Canales placa C-1

4.7. Detectores de fugas y extractor.

Por motivos de seguridad y para cumplir con la normativa ATEX, la instalación cuenta con un detector de posibles fugas. Se trata de un Honeywell Sensepoint XCD calibrado para la detección de fugas de gases inflamables. Las características de este sensor se encuentran en la tabla 24.

Designación	Rango de escala completa	Rango por defecto	Tiempo de respuesta (sec)	Precisión	Puntos de alarma por defecto	
					A1	A2
Honeywell Sensepoint XCD	20 a 100% L.E.L	100%L.E.L	<30	<±1%L.E.L	20%L.E.L	40%L.E.L

Tabla 24. Características Honeywell Sensepoint XCD



Figura 38. HoneywellSensepoint XCD.

Además, la normativa ATEX especifica que ningún elemento que pueda generar una chispa puede encontrarse a ras de suelo, puesto que los elementos potencialmente explosivos que se utilizarían son más pesados que el aire. Por lo que todos los elementos electrónicos y el cableado se han colocado de manera que se encuentren a, al menos, 20 cm del suelo. Esto medida se ha realizado mediante la elevación de todos los elementos de la instalación mediante bloques de hormigón, como se muestra en la figura 39.

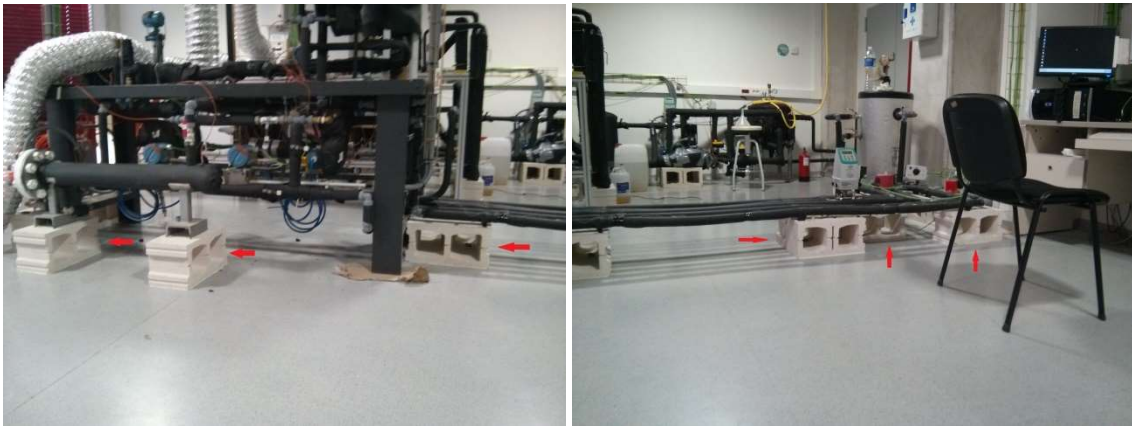


Figura 39. Sistema de elevación de la instalación.

Como medida final ante una posible fuga de cualquier tipo o en el caso de que se quiera vaciar los conductos y el depósito de algún gas, la instalación cuenta con un sistema de extracción de gas. Como se puede apreciar en la figura 40 cuenta con una manguera flexible de aluminio que se puede colocar donde sea necesario. La conducción lleva los gases extraídos al exterior por la parte superior de una de las ventanas. Este sistema es compartido con la otra instalación, de ahí la división en dos mangueras.



Figura 40. Sistema de extracción.

4.8. Válvulas

La instalación cuenta con una serie de válvulas distribuidas de manera que mediante su manipulación se puede seleccionar el recorrido deseado para cada fluido en cada circuito. Las válvulas son de dos tipos dependiendo del tipo de tubería en el que están instaladas.

Para la tubería de polibutileno que como ya se especificó, trasiega agua, se han seleccionado las válvulas tipo Arco de la serie Tajo 2000. La serie TAJO 2000 son válvulas metálicas de esfera, de accionamiento manual, que por su diseño y materiales son adecuadas para su uso en:

- Redes de distribución de agua potable.
- Sistemas de distribución de agua caliente.
- Redes de aire.
- Aplicaciones neumáticas e hidráulicas.

Las condiciones de servicio de estas válvulas son:

- Presión de servicio hasta 30 bar y presiones puntuales hasta 45 bar.
- Temperatura de servicio desde -20°C, excluyendo la congelación, hasta 140°C.

Estas válvulas se indican en el esquema de la figura 20 numeradas de 1 a 16, y se pueden ver en la figura 41.



Figura 41. Válvula serie Tajo 2000.

Para la tubería de cobre se han instalado otro tipo de válvulas. Son válvulas de paso (de globo o esfera) para sistemas de refrigeración, de 1/2" con extensión soldable de tubo de cobre de 1/2", de marca ESSEN. Las especificaciones de estas válvulas son estas:



- Ofrece la máxima presión de trabajo: 700 psi.
- Cuerpo de latón, muy robusto.
- Presión máxima de operación: 700 psi (48 bar).
- Rango de temperatura: -40°f (-40°c) a 300°f (150°c).
- Compatible con refrigerantes HFC, HCFC, CFC (134a, 404a, 407c, 410a).
- Aprobada por UL 422n, enlistada en Ce.
- 100 probada con helio a máxima presión.
- Diseño mejorado que garantiza "0" fugas.

Estas válvulas se indican en el esquema de la figura 20 ordenadas alfabéticamente desde la A a la F. Se pueden apreciar en la figura 42:



Figura 42. Válvula ESSEN.

4.9. Enfriadora

La instalación cuenta con una máquina enfriadora Airwell MQL 08 M que es la encargada de retirar el calor necesario del depósito de agua, reduciendo así la temperatura de los circuitos de refrigeración primario y secundario. Esta máquina se encuentra ubicada en una habitación distinta de la instalación principal. Sus especificaciones técnicas están reflejadas en la tabla 25.

Designación	Potencia (max)	Alta presión (max)	Baja presión (max)	Alimentación
Airwell MQL 08 M	4.6 kW	28 bar	18.6 bar	230 V 50 Hz

Tabla 25. Características enfriadora Airwell MQL 08 M.



Figura 43. Enfriadora Airwell MQL 08 M

4.10. Calentador

Para elevar la temperatura del agua del circuito de evaporación se utiliza un calentador Watlow. Es un calentador de resistencia sumergible compuesto por una barra de acero inoxidable. Las características técnicas pueden apreciarse en la tabla 26.

Denominación	Densidad de potencia	Potencia	Tensión	Temperatura de vaina (max)
Calentador de resistencia	15.5 W/cm ²	24 kW	480 V	870 °C

Tabla 26. Características calentador eléctrico.

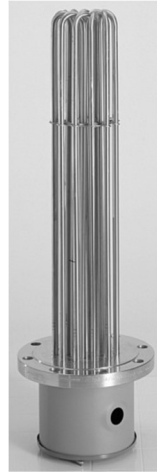


Figura 44. Calentador de resistencia sumergible Watlow.

4.11. Intercambiadores de calor

La instalación cuenta con dos intercambiadores de calor de la marca Swep. Uno de ellos está instalado en el circuito de evaporación de manera que intercambia calor entre el agua de evaporación y el refrigerante con el objetivo de elevar el título de vapor de dicho refrigerante hasta un valor deseado. El otro intercambiador se encuentra instalado en el circuito de refrigeración secundario y actúa como condensador, intercambiando calor entre el agua de refrigeración y el refrigerante con el objetivo de condensar por completo a este último o para subenfriarlo.



Figura 45. Intercambiador de placas Swep.

4.12. Conexión eléctrica

En este apartado se describirán las distintas líneas eléctricas que componen esta instalación, indicando que elementos están conectados a cada una, todo ello con la ayuda de un plano unifilar que se muestra en la figura 46. Es importante indicar que la habitación en la que se encuentra la instalación también se encuentra una instalación parecida destinada al estudio de evaporación en mini-canales, y por lo tanto comparten alimentación eléctrica, razón por la cual en el plano unifilar aparecen dos instalaciones.

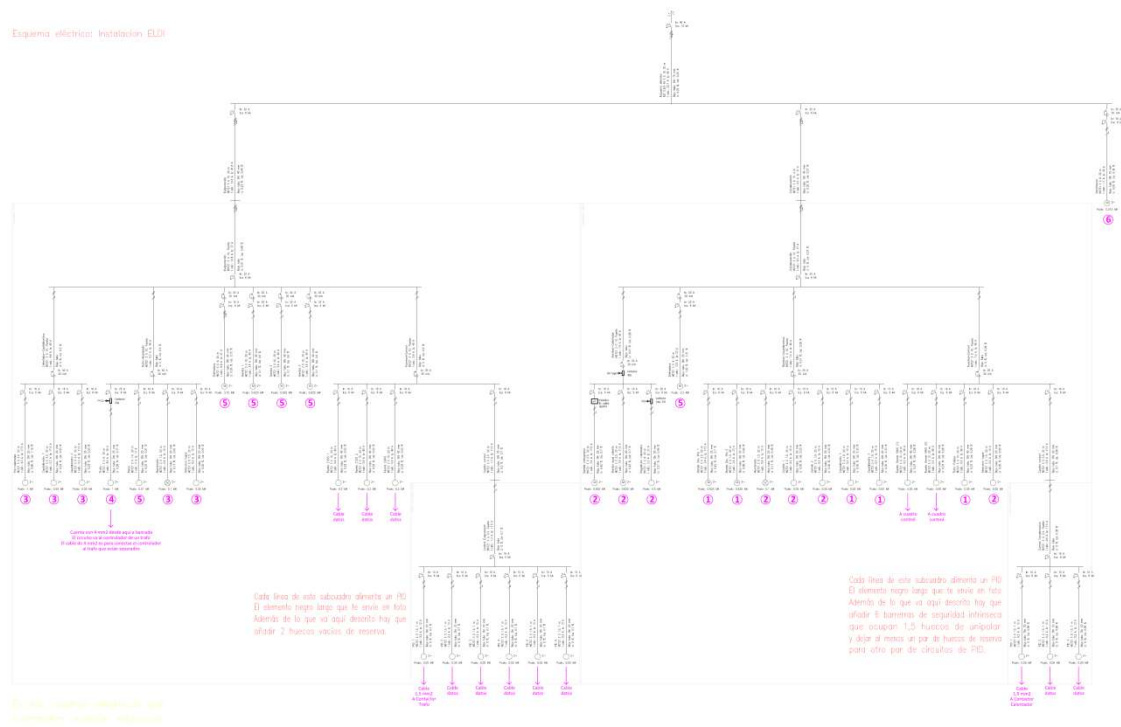


Figura 46. Esquema unifilar.

La alimentación de ambas instalaciones viene de la línea principal (Línea Esquema eléctrico intensidad nominal 40 A e intensidad de corte 10 kA, 20 m de longitud y 16 mm² de sección) que se divide en la línea que alimenta al cuadro de evaporación, la que alimenta el cuadro de condensación y la que alimenta la ventilación. La línea de ventilación está protegida por un diferencial de intensidad nominal 25 A y un electromagnético de intensidad nominal 16 A e intensidad de corte 6 kA y la de condensación por un magnetotérmico de intensidad nominal 32 A e intensidad de corte 6 kA.

La línea de condensación se divide en 4 grupos cada uno de ellos conectados a un diferencial de intensidad nominal 25 A. Los grupos se han marcado del 1 al 4 con números en negro según se muestra en la figura 47.

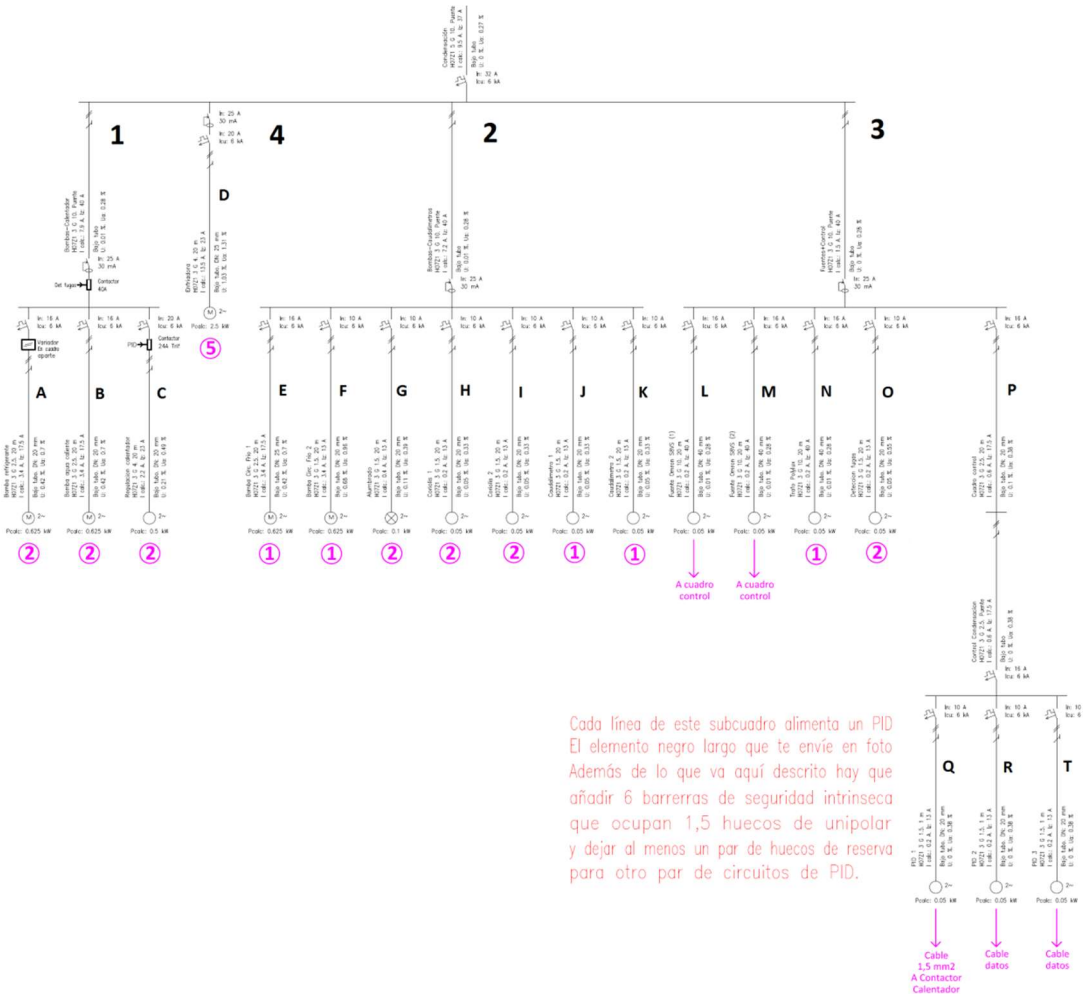


Figura 47. Esquema grupos.

- Grupo 1, Bomba-Calentador. Alimenta a:
 - A: Bomba Micropump del circuito de refrigerante. Conectada a un magnetotérmico de intensidad nominal 16 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 2.5 mm de diámetro. Consume 0.625 kw
 - B: Bomba de circulación del circuito de evaporación. Conectada a un magnetotérmico de intensidad nominal 16 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 2.5 mm de diámetro. Consume 0.625 kw.
 - C: Calentador del circuito de evaporación. Conectado a un magnetotérmico de intensidad nominal 20 A e intensidad de corte 6 kA y a un PID mediante un cable de 20 m de longitud y 4 mm de diámetro. Consume 0.5 kw.

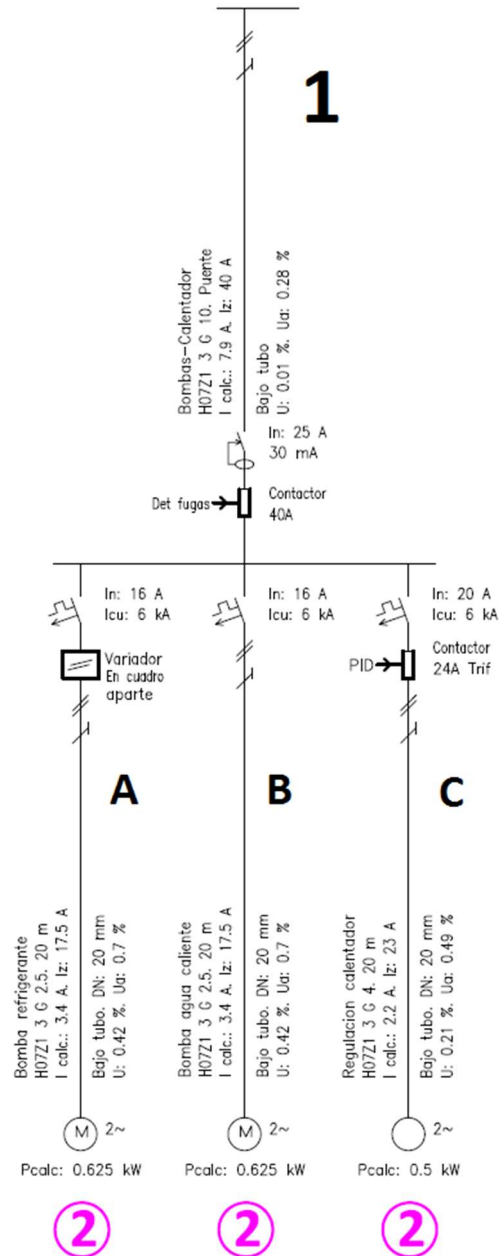


Figura 47. Grupo 1.

- Grupo 2, Bomba-Caudalímetros. Alimenta a:
 - E: Bomba del circuito de refrigeración secundario. Conectada a magnetotérmico de intensidad nominal 16 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 2.5 mm² de sección. Consume 0.625 kw.



- F: Bomba del circuito de refrigeración primario. Conectada a un magnetotérmico de intensidad nominal 10 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 1.5 mm² de sección. Consume 0.625 kw.
- G: Alumbrado. Conectado a un magnetotérmico de intensidad nominal 10 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 1.5 mm² de sección. Consume 0.1 kw.
- H: Coriolis del circuito principal. Conectado a un magnetotérmico de intensidad nominal 10 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 1.5 mm² de sección. Consume 0.5 kw.
- I: Coriolis del circuito de refrigeración primario. Conectado a un magnetotérmico de intensidad nominal 10 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 1.5 mm² de sección. Consume 0.5 kw.
- J: Caudalímetro electromagnético del circuito de evaporación. Conectado a un magnetotérmico de intensidad nominal 10 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 1.5 mm² de sección. Consume 0.5 kw.
- K: Caudalímetro electromagnético del circuito de refrigeración secundario. Conectado a un magnetotérmico de intensidad nominal 10 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 1.5 mm² de sección. Consume 0.5 kw.

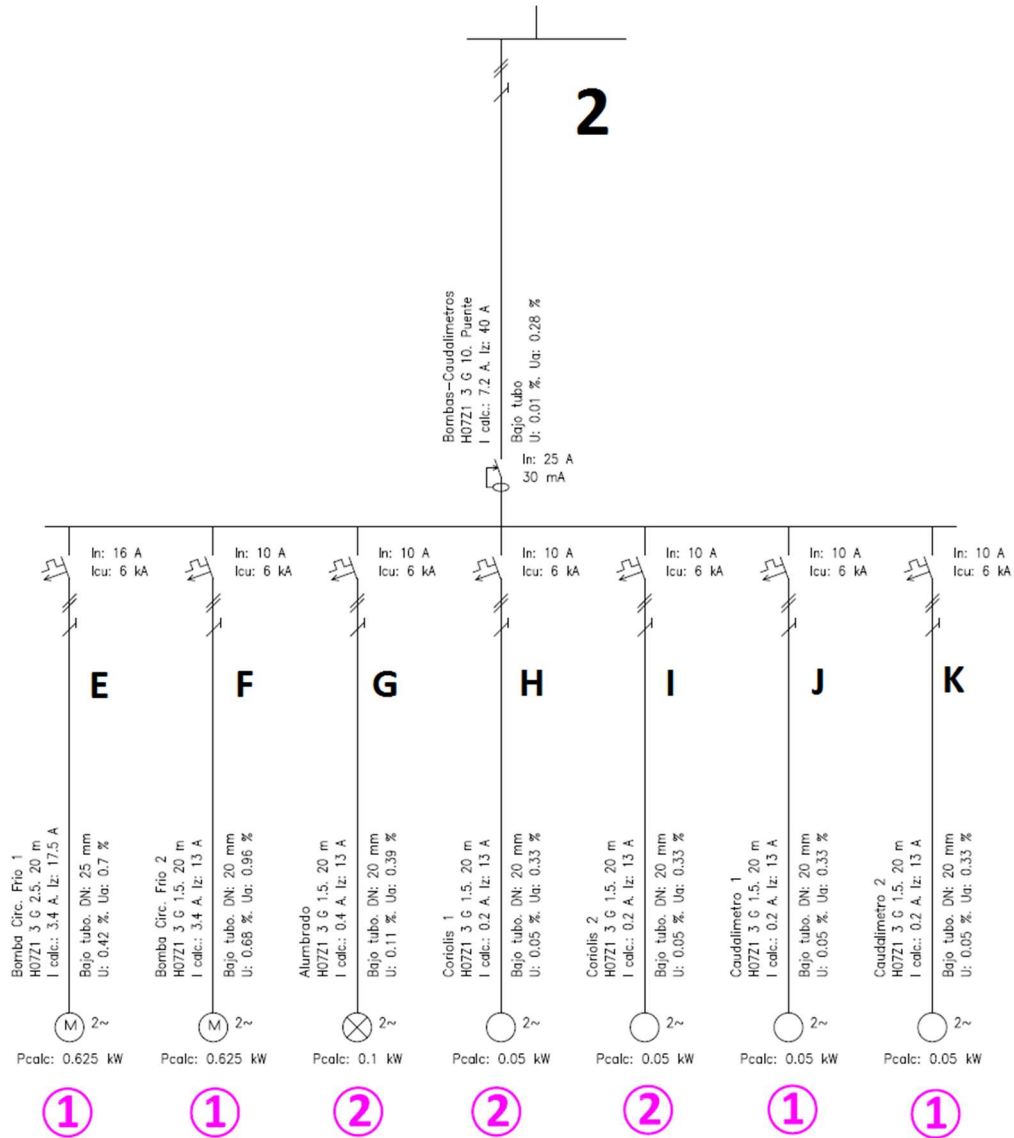


Figura 48. Grupo 2.

- Grupo 3: Fuentes – Control. Alimenta a:
 - L: Fuente omron. Conectada a un magnetotérmico de intensidad nominal 16 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 10 mm² de sección. Consume 0.05 kw.
 - M: Fuente omron. Conectada a un magnetotérmico de intensidad nominal 16 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 10 mm² de sección. Consume 0.05 kw.
 - N: Transformador Polylux. Conectado a un magnetotérmico de intensidad nominal 16 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 10 mm² de sección. Consume 0.05 kw.

- O: Detector de fugas HoneywellSensepoint. Conectado a un magnetotérmico de intensidad nominal 10 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 1.5 mm² de sección. Consume 0.05 kw.

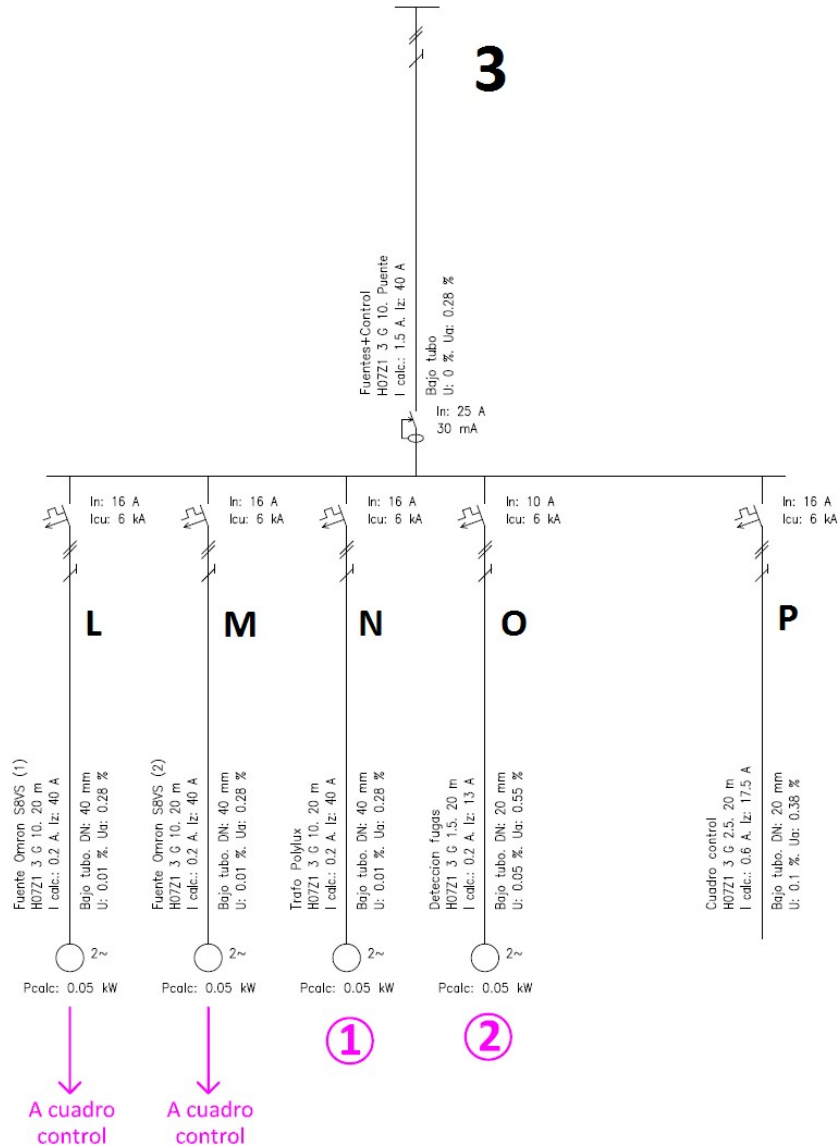


Figura 49. Grupo 3.

- P: Esta línea es la del cuadro de control. Está conectada a un magnetotérmico de intensidad nominal 16 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 2.5 mm² de sección. Esta línea alimenta a los 3 PID comerciales, cada uno conectado a su magnetotérmico correspondiente de intensidad nominal 10 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 1 m de longitud y 1.5 mm² de sección. Cada uno Consume 0.05 kw.

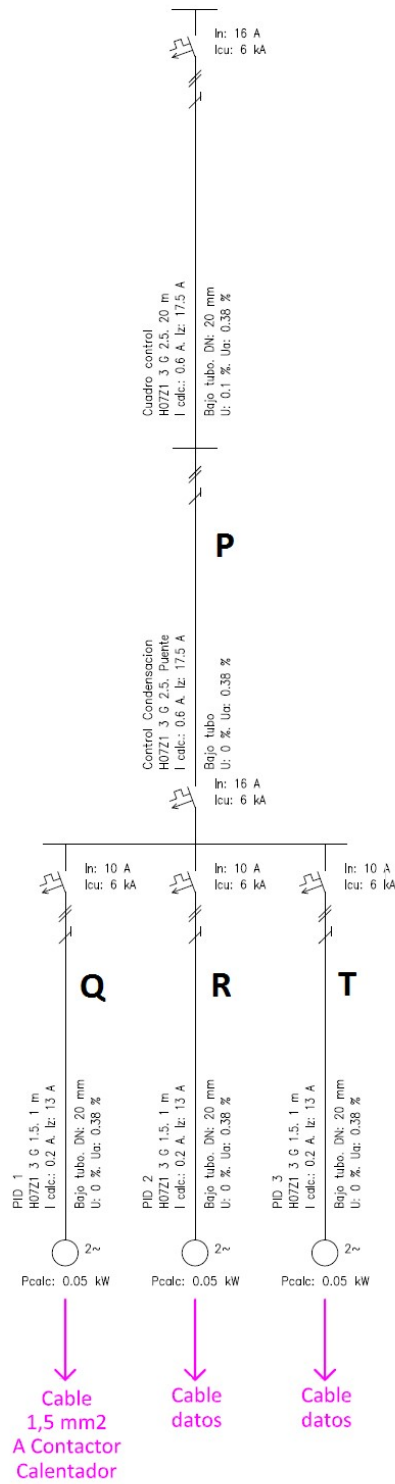


Figura 50. Grupo PID.

- Grupo 4: Enfriadora. Esta línea alimenta la enfriadora. Está conectada a un magnetotérmico de intensidad nominal 20 A e intensidad de corte 6 kA mediante un cable de 20 m de longitud y 4 mm² de sección. Consume 2.5 kw.



Figura 51. Grupo 4.

4.12.1. Conexión PID

La conexión de los tres PID comerciales que controlan las dos válvulas de tres vías y el calentador han sido conectados según su manual de instrucciones. No obstante, es interesante explicar la conexión de estos elementos.

La conexión de los PID empieza con la alimentación eléctrica de baja corriente (230 V). Se trata de los cables azul y marrón que van conectados en los canales 98 y 99, como se puede ver en la figura 52.

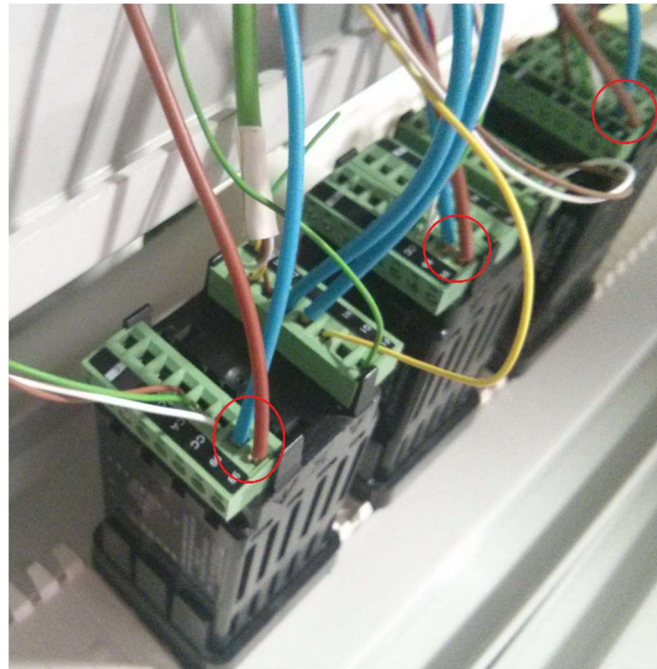


Figura 52. Alimentación PIDs.

Después es necesario conectar el sensor del que obtendrán las señales de entrada. En este caso los sensores de los tres PID son las RTDs a las entradas de las bombas de los circuitos de evaporación, refrigeración primario y secundario. Con estos datos se controlan las válvulas de tres vías y la potencia del calentador. Las RTDs se conectan por medio de tres cables a los canales T1, R1 y S1 como se ve en la figura 53.

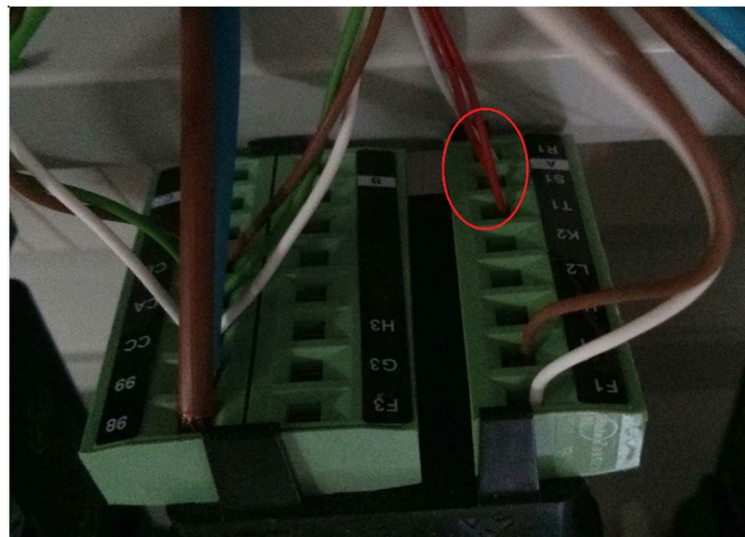


Figura 53. Conexión RTD en los PID.

La señal de salida tiene que ser recibida por un actuador. En este caso resultan ser las válvulas de tres vías y el calentador. En el caso del PID del calentador esta conexión es mediante dos cables en los canales F1 (negativo) y H1 (positivo) como se puede ver en la figura 54. Y en el caso de las válvulas la conexión es por medio de otros dos cables en los canales F1 (negativo) y G1 (positivo), como se puede ver en la figura 54. Cabe destacar que en el caso del PID del calentador la señal de salida pasa primero por el Watlow DIN-a-mite®, conexión que se puede apreciar en la figura 55.

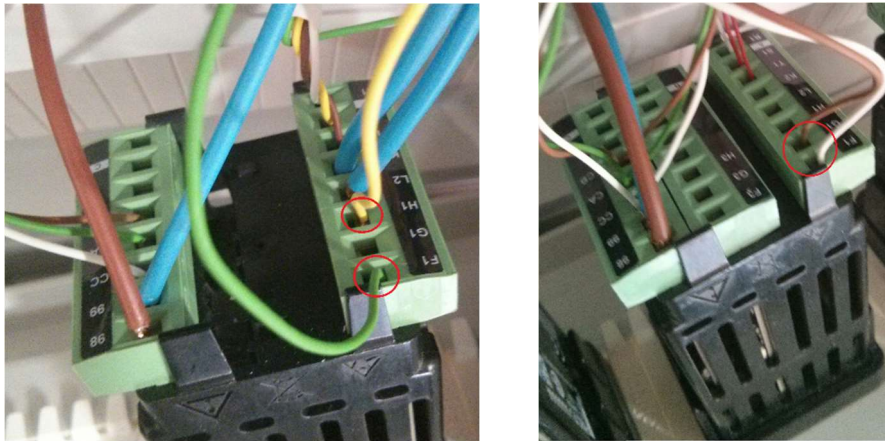


Figura 54. De izquierda a derecha: Conexión de señal de salida del PID del calentador y conexión de señal de salida de los PID con válvula de 3 vías.

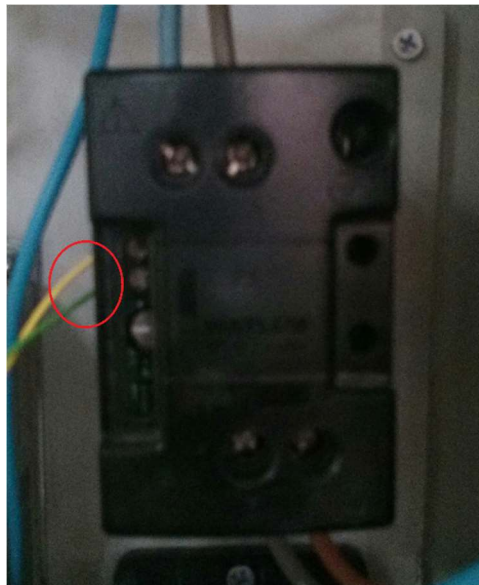


Figura 55. Conexión del Watlow DIN-a-mite®

Además, el PID encargado del control del evaporador está conectado a un contactor por razones de seguridad. Esta conexión permite establecer un valor límite de la variable que nos interese y en caso de ser sobrepasada el sistema corta la alimentación de los elementos, en este caso, la del evaporador. La conexión es por medio de dos cables azules en los canales L2 y K2 como se puede ver en la figura 56.

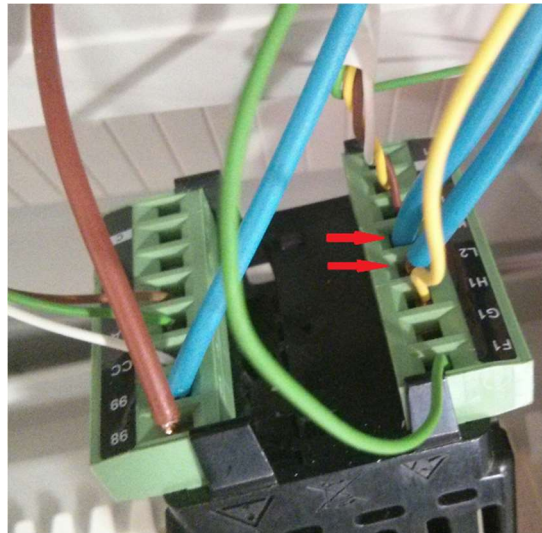


Figura 56. Conexión contactor al PID

Finalmente, para poder realizar el control de los PID mediante el ordenador es necesario conectarlos de manera que estén comunicados entre ellos. Es una conexión en serie para utilizar el protocolo RS485. Esta conexión se realiza mediante tres cables (blanco, marrón y verde) conectados a los canales CA, CB y CC como se puede ver en la figura 57. Esa comunicación en serie se lleva a un adaptador y a un conversor de interfaz que nos permite conectarlo al ordenador. Dicho adaptador se puede ver en la figura 58.

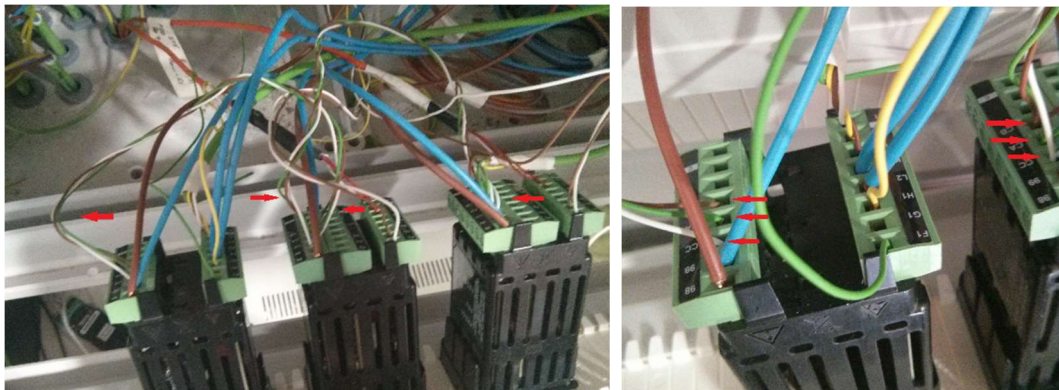


Figura 57. Comunicación entre PIDs.



Figura 58. Adaptador y conversor.

4.12.2. Barreras intrínsecas de seguridad

Una de las medidas de seguridad de la instalación consiste en el uso de unas barreras intrínsecas de seguridad para algunos de los sensores que requieren de alimentación eléctrica. Estos sensores son los caudalímetros de efecto Coriolis y los tres sensores de presión. El objetivo de estas barreras es evitar que existan puntos calientes en la instalación si ocurre algún tipo de fallo. Si ocurre dicho fallo las barreras intrínsecas detectan el cambio de demanda de potencia y limitan la cantidad que llega a los sensores.

La conexión de estas barreras también es muy sencilla. Están alimentadas por una fuente de alimentación omron conectada en serie a las barreras intrínsecas, como se puede apreciar en la figura 59 (cables marrón y blanco). Los caudalímetros se conectan mediante dos cables ocupando cada uno dos barreras intrínsecas debido a que envían dos tipos de información. Por otro lado, los sensores de presión sólo necesitan dos entradas a las barreras por lo que los dos sensores de presión absoluta ocupan una y el diferencial ocupa otra. Estos detalles se pueden apreciar en las figuras 60 y 61.

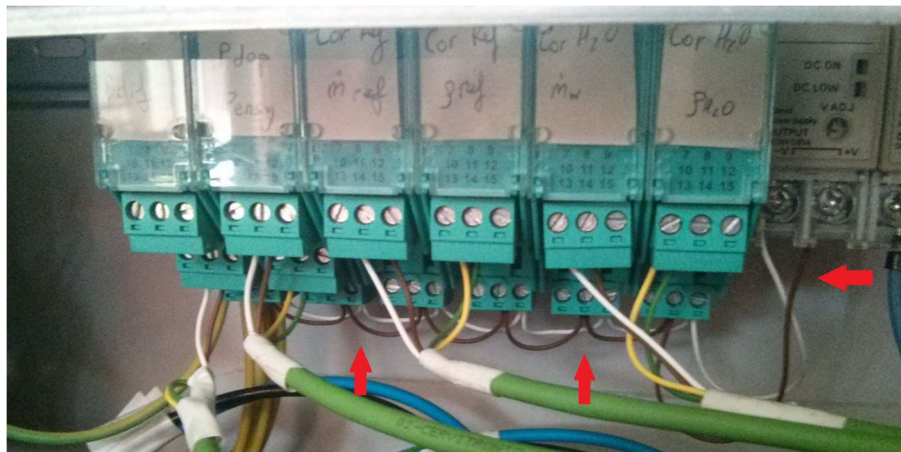


Figura 59. Alimentación en serie.



Figura 60. Conexión caudalímetros en barreras.



Figura 61. Conexión sensores de presión en barreras.

4.12.3. Fuentes de alimentación

La instalación cuenta con cuatro fuentes de alimentación mediante las cuales reciben alimentación las barreras intrínsecas de seguridad, los dos caudalímetros de coriolis y al detector de fugas. La conexión de estos elementos no guarda ningún misterio, obviando la encargada de alimentar las barreras intrínsecas cuya conexión se explicó en el punto 4.11.2. La alimentación la reciben de la conexión a la corriente y cada una la distribuye a su elemento. No obstante, es interesante comentar su existencia e indicar para que elemento está destinada cada fuente. Esto se puede apreciar en la figura 62 y en la figura 63.

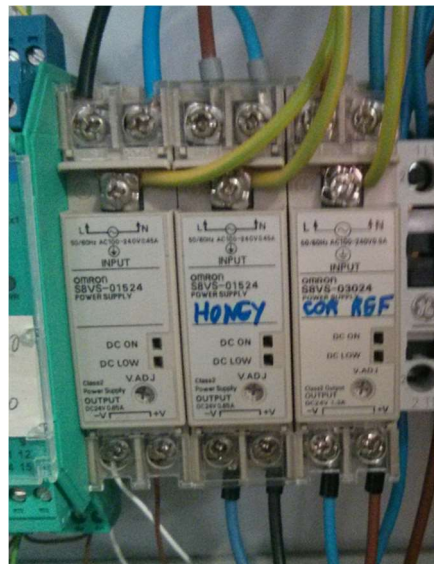


Figura 62. De izquierda a derecha: Fuente de alimentación de las barreras intrínsecas, fuente de alimentación del detector de fugas y fuente de alimentación del caudalímetro coriolis del circuito de refrigerante.



Figura 63. Fuente de alimentación del caudalímetro coriolis del circuito de refrigeración primario.

4.12.4. Conexión de seguridad

Además del resto de medidas de seguridad anteriormente explicadas que incluye la instalación para cumplir con las normativas pertinentes, se tiene un intrincado sistema de conexión eléctrica que, en caso de altas subidas de temperatura, de presión o posibles fugas, se cortaría la corriente de alimentación de: la bomba de refrigerante, la bomba del circuito de evaporación y del calentador. Esto es así porque ante una fuga o cualquier tipo de inconveniente grave los elementos peligrosos serían el refrigerante por su característica inflamable, el agua caliente por la temperatura que podría alcanzar y cualquier tipo de punto caliente eléctrico. Si se produjera por ejemplo una fuga de cualquiera de los circuitos de refrigeración resultaría un problema menor, pues la fuga sería de agua fría que no es un elemento peligroso en ningún sentido.

Se tiene un contactor de 24 amperios que se encarga de cortar la potencia que le llega al calentador y otro, conectado aguas arriba, de 40 amperios que se encarga de cortar la potencia a la bomba de refrigerante y la del circuito de evaporación, y además la alimentación del otro contactor. A partir de ahora se nombrarán como contactor 1 al de 40 amperios y contactor 2 al de 24.

La bobina del contactor 2 se alimenta mediante los terminales A1 y A2 como se muestra en la figura 64.

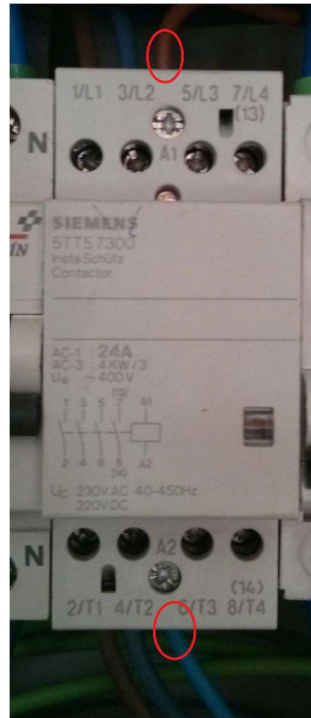


Figura 64. Contactor 1.

El cable marrón va a un tercer contactor, al que se llamará a partir de ahora contactor 3, como se muestra en la figura 65.

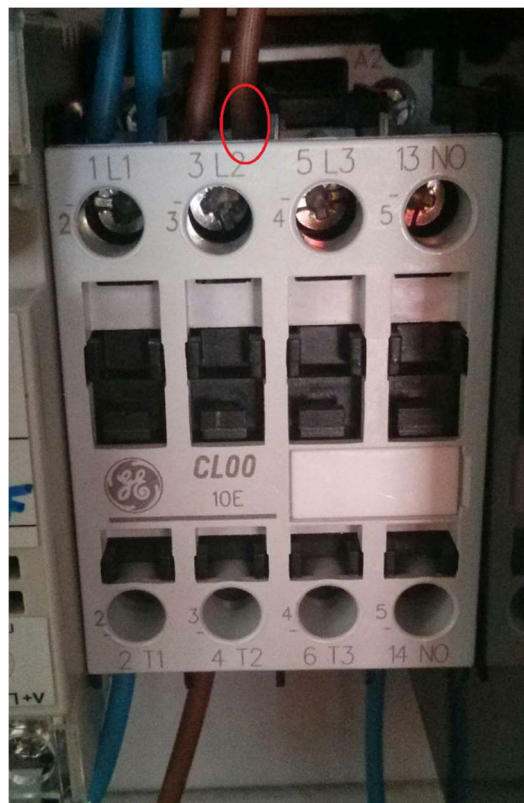


Figura 65. Conexión contactor 2 con contactor 3.

Y el cable azul, que es el neutro, va conectado al relé mecánico del PID del calentador, como se mostró en punto 4.11.1. Entrando por el canal K2 y saliendo por el canal L2, llevando dicha salida al contactor 3, como se ve en la figura 66. De esta manera si se obtienen temperaturas demasiado altas en el calentador respecto a un punto preestablecido en el PID, su relé mecánico abriría el contacto evitando que pase la corriente y por lo tanto la bobina del contactor 2 también saltaría, y este no dejaría pasar potencia al calentador. Así, se tiene un sistema de seguridad en base a subidas de temperatura excesivas.



Figura 66. Conexión PID con contactor 3.

Por otro lado, la bobina del contactor 1 se alimenta a través del contactor 3 de igual manera que el contactor 2, es decir, mediante la conexión de los canales A1 y A2, como se puede apreciar en las figuras 67 y 68.



Figura 67. Contactor 1.



Figura 68. Conexión contactor 1 con contactor 3.

Para alimentar al contactor 3, y por lo tanto al 1, se necesitan 24 voltios de corriente alterna. Es por ello que el contactor 3 recibe su alimentación mediante la conexión de sus canales A1 y A2 a un transformador, como se muestra en las figuras 69 y 70 (En la figura 70 se pueden ver un juego de dos cables verdes y dos cables amarillos, de menor sección. Estos cables simplemente sirven para alimentar eléctricamente a las válvulas de 3 vías que también necesitan 24 voltios de corriente alterna). El cable azul, que va al neutro, se conecta al terminal de 0 voltios del transformador, y del terminal de 24 voltios se saca la fase.



Figura 69. Alimentación del contactor 3.

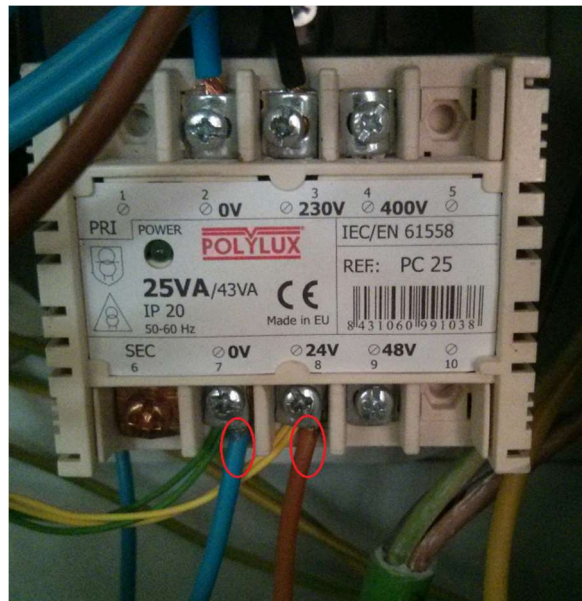


Figura 70. Conexión contactor 3 con transformador.

Sin embargo, la fase no va directamente del transformador al contactor 3, sino que se hace pasar primero por el detector de fugas y por el presostato que se encuentra en el depósito de refrigerante. De esta manera si se detecta una fuga, o si la presión del depósito es demasiado alta salta la alimentación del contactor 3 y como consecuencia, se corta la alimentación del contactor 1 que corta a su vez la alimentación de las bombas de refrigerante y del circuito de evaporación. Por lo tanto, mediante esta conexión se tiene un sistema de conexión de seguridad en base a posibles fugas de refrigerante o subidas excesivas de presión.

En la figura 71 se puede ver un esquema simplificado de esta conexión de seguridad.

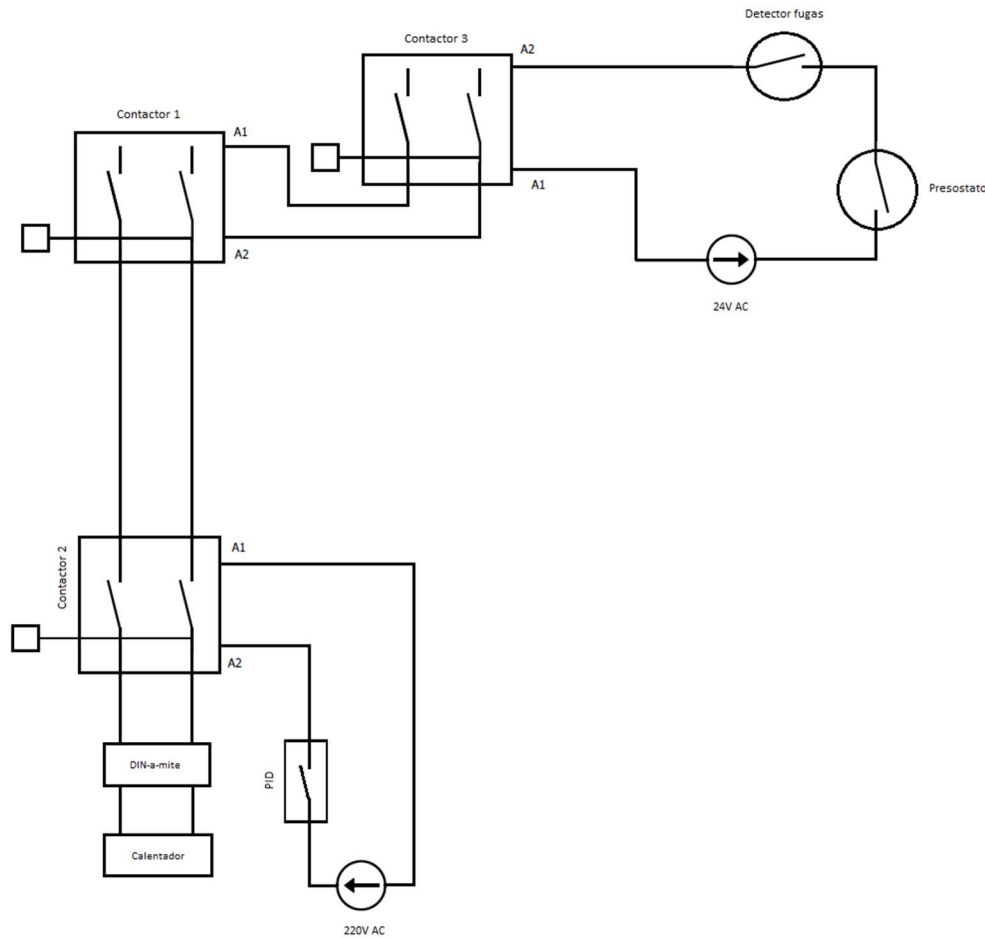


Figura 71. Esquema conexión de seguridad.

4.13. Resumen del capítulo

En este capítulo se ha recopilado toda la información práctica de la instalación objeto de este proyecto. En un primer lugar se ha explicado el objetivo que se persigue con su construcción, que es el estudio del proceso de condensación dentro de minicanales, y se ha seguido, desde el punto de vista de los fluidos, el recorrido de cada uno de los circuitos. Después se ha explicado uno a uno todos los elementos que forman parte de este sistema, la razón particular de cada uno de ellos y se ha dado información sobre sus características técnicas. Finalmente se ha recopilado toda la información referente a las distintas conexiones eléctricas a nivel general para terminar dedicando una sección a las conexiones eléctricas particulares de esta instalación.

Este documento, por tanto, recoge toda la información necesaria para la puesta en funcionamiento de la instalación.



Capítulo 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

Al principio de este documento se establecieron unos objetivos a cumplir durante el desarrollo del mismo. Dichos objetivos permiten discutir el resultado del mismo y, además, establecer acciones futuras respecto a la instalación.

Durante los primeros meses junto al director, el codirector y la empresa encargada de realizar el montaje de la instalación, se realizó satisfactoriamente su montaje, incluyendo pruebas de presión y de fugas. Cabe destacar, no obstante, que todo este proceso resultó mucho más lento de lo esperado debido principalmente a la falta de disponibilidad de los trabajadores, por lo que el montaje de la instalación, aunque terminó realizándose sin mayores inconvenientes, estuvo terminado mucho más tarde de lo esperado, aunque es importante recordar que dicho montaje se realizó simultáneamente al montaje de la otra instalación de la sala. El montaje de los cuadros eléctricos, por otro lado, se realizó de manera mucho más rápida en el transcurso de dos semanas, una vez el resto la instalación estuvo finalizada. Durante el propio proceso de montaje también se supervisó que la instalación cumpliera de manera adecuada la normativa ATEX.

A continuación, comenzó la búsqueda documental de todos los sensores y elementos que forman la instalación. Este proceso de búsqueda y lectura, sobre todo, de manuales cumplió con el objetivo de la adquisición de conocimientos necesarios para el control y manejo de los elementos activos de la instalación. Algunos elementos no pudieron identificarse por completo por diversos problemas. Resultó imposible identificar el modelo exacto de calentador pues ya estaba completamente aislado y no merecía la pena retirar ese aislamiento para tener que volver a colocarlo. Algo parecido ocurrió con los intercambiadores de calor que, además, cualquier etiqueta de información sobre sus características se encontraba perdida o en muy mal estado, por lo que sus características exactas sólo se pueden suponer en base a la información de catálogos. No obstante, esto son sólo dos casos aislados pues el resto de elementos se pudo identificar y documentar adecuadamente, como se puede comprobar en este proyecto, y cualquier información adicional sobre estos se puede encontrar en la recopilación de manuales que se dejará en la instalación a disposición del que los necesite.



Finalmente se ha realizado este documento que cumple con el objetivo de recopilar, redactar, organizar y hacer accesible toda la información que resume la información completa y necesaria para entender, manejar y modificar, si fuera necesario, modificar la instalación o partes de esta, cumpliendo de esta manera los objetivos tanto académicos como a nivel de formación personal del autor de este documento.

Por lo que se puede concluir que los objetivos planteados se han cumplido de manera más o menos satisfactoria.

5.2. Trabajos futuros

Este trabajo abre la puerta a futuros trabajos y acciones:

- Realización de ensayos que siempre fue el objetivo final que se ha perseguido con el montaje de la instalación.
- Adecuar el manejo de la instalación mediante el software LabVIEW pues en el momento de escribir este documento dicho manejo se realiza mediante Matlab.
- Evolucionar el control de la instalación incluyendo más elementos de hardware de manera que se reduce la dependencia del control por software. Este tipo de control se propone tomando como referencia el control de la instalación de evaporación. Resulta un método más caro debido a la necesidad de comprar más elementos, pero también es un método de control mucho más seguro y que, además, es el utilizado en la industria.
- Estudiar otras geometrías de tubos multipuerto y contrastar los datos obtenidos con las correlaciones que otros autores han obtenido previamente.
- Obtener correlaciones propias para tubos multipuerto bajo procesos de condensación.



BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Moran & Sapiro. Fundamentos de termodinámica técnica. Tomos 1 y 2. Editorial Reverté. Segunda edición. 1995
- [2] Alejandro López Belchí. Characterisation of heat transfer and pressure drop in condensation processes within mini-channel tubes with last generation of refrigerant fluids. 2014.
- [3] P.B Whalley. Two-Phase flow and heat transfer. Editorial Zeneca. 1996
- [4] J.S. Wilson. Sensor Technology Handbook. Editorial Elsevier. 2004
- [5] Alejandro López Belchí. Instrumentación y control de una instalación experimental para el estudio de fenómenos de condensación en microcanales. 2010
- [6] Nae-Hyun Kim, Jin-Pyo Cho, Jung-Oh Kim, Baek Yun. Condensation heat transfer of R-22 and R-410A in flat aluminum multi-channel tubes with or without micro-fins. 2003
- [7] F. Illián Gómez, A. López Belchí, J.R García-Cascales, F. Vera-García. Experimental two-phase heat transfer coefficient and frictional pressure drop inside mini-channels during condensation with R1234yf and R134a. 2014
- [8] S.M. Zivi, Estimation of steady-state steam void-fraction by means of the principle of minimum entropy production, *Journal of Heat Transfer*, 86 (1964) 247.
- [9] A.S. Dalkilic and S. Wongwises, Intensive literature review of condensation inside smooth and enhanced tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009) 3409-3426.
- [10] J. Winkler, J. Killion, S. Garimella, and B.M. Fronk, Void fractions for condensing refrigerant flow in small channels: Part I literature review, *International Journal of Refrigeration*, 35 (2012) 219-245.
- [11] W.M. Kays and A.L. London, *Compact heat exchangers*, (1984).
- [12] F.F. Abdelall, G. Hahn, S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-Khalik, S.S. Jeter, M. Yoda, and D.L. Sadowski, Pressure drop caused by abrupt flow area changes in small channels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29 (2005) 425-434.
- [13] G.F. Hewitt, G.L. Shires, and T.R. Bott, *Process heat transfer*, CRC press London, 1994.



- [14] J.W. Coleman and P.E. Krause, Two phase pressure losses of R134a in microchannel tube headers with large free flow area ratios, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28 (2004) 123-130.
- [15] J. Schmidt and L. Friedel, Two-phase pressure drop across sudden contractions in duct areas, *International Journal of Multiphase Flow*, 23 (1997) 283-299.
- [16] W.H. Ahmed, C.Y. Ching, and M. Shoukri, Pressure recovery of two-phase flow across sudden expansions, *International Journal of Multiphase Flow*, 33 (2007) 575-594.
- [17] M. Zhang and R.L. Webb, Correlation of two-phase friction for refrigerants in small-diameter tubes, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 25 (2001) 131-139.
- [18] J.G. Collier and J.R. Thome, *Convective boiling and condensation*, Oxford University Press, 1994.
- [19] <http://www.ni.com/tutorial/7113/es/#toc1>