

TRABAJO FIN DE MASTER

SISTEMA DE CONTROL DE UNA PLANTA EXPERIMENTAL HIDRÁULICA MEDIANTE DISPOSITIVOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE SIEMENS.

TRABAJO FIN DE MASTER
PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MASTER EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL

JUNIO 2023

Daniel Rodríguez Nieto

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER:

**Jorge Muñoz Paniagua y
Jaime del Cerro Giner**

“Los hombres geniales empiezan grandes obras, los hombres trabajadores las terminan”

- Leonardo Da Vinci

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a a todas las personas que han contribuido al éxito de este proyecto y han brindado su apoyo y orientación a lo largo del camino.

En primer lugar, quiero agradecer a mis dos tutores, Jorge Muñoz y Jaime del Cerro, por su valiosa guía, conocimiento y paciencia durante todo el proceso. Su compromiso y dedicación han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo y para mi crecimiento académico y profesional.

También quiero expresar mi sincero agradecimiento al equipo de Siemens por su valiosa ayuda y colaboración. En particular, quiero mencionar a Héctor Rubio por su especial atención a mis dudas relacionadas con SIMATIC. Su conocimiento y disposición para resolver mis inquietudes han sido de gran valor y han contribuido significativamente al avance del proyecto. También a Héctor Martín por su apoyo relacionado con la parte física de los componentes del banco de ensayo. Su experiencia y asesoramiento han sido fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento de los elementos y para superar los desafíos técnicos que surgieron durante el proceso.

No puedo olvidar la ayuda que me ha dado mi tío al compartir sus conocimientos de ingeniería relacionados con las bombas centrífugas y sistemas automatizados, con los que trabaja a diario en su empresa. Sus aportes han sido invaluable y me han brindado una perspectiva adicional que ha enriquecido mi comprensión en estas áreas.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a todos aquellos que, de una forma u otra, me han brindado su apoyo, alentándome en cada paso y brindándome palabras de aliento y motivación.

RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto tiene como objetivo llevar a cabo la reparación, puesta en marcha y operación de un banco de ensayo de bombas hidráulicas, automatizado utilizando componentes para la automatización de Siemens. El banco de ensayo ha sido concebido como un demostrador tecnológico de industria 4.0, haciendo uso de elementos de tecnológicos actuales que, interconectando mediante diferentes buses de campo y redes de datos sistemas de control de planta como actuadores basados en variadores de frecuencia para modificar de forma continua el régimen de trabajo de bombas hidráulicas, válvulas proporcionales y válvulas todo-nada, así como diferentes sensores hidráulicos (de presión, caudalímetros de diferentes tecnologías de medida, etc.).

Estos dispositivos son fundamentales para realizar un estudio detallado del comportamiento de las bombas y el flujo de agua en un circuito. Además, el banco de ensayo incluye otros componentes, como dispositivos de control de nivel de agua y un sistema de registro de datos, que se explicarán en detalle en el cuerpo de este trabajo.

Durante el desarrollo de este proyecto, se han enfrentado desafíos significativos, como la puesta a punto del banco de ensayo y la reparación de elementos averiados. Estos contratiempos han retrasado considerablemente el proceso de automatización, ya que se ha tenido que reparar el sensor de presión de una de las bombas y actualizar la infraestructura eléctrica del banco de ensayo. Además, se ha llevado a cabo una comparación de las curvas características de las bombas con los datos proporcionados por el fabricante de las mismas, lo que ha permitido, en base a las diferencias obtenidas, identificar y localizar problemas en el sistema hidráulico que han sido satisfactoriamente resueltos.

Por último, se han implementado a modo de demostrador tecnológico dos estrategias de control diferenciadas, que permiten lograr una mayor precisión y eficiencia en la automatización del banco de ensayo. La primera de ellas, un sistema de control de eventos discretos mediante un SFC (*Sequential Function Chart*) de arranque para implementar un arranque seguro del sistema, así como un lazo de control continuo clásico basado un CFC (*Continuous Function Chart*) que representa un PID (*Proportional-Integral-Derivative*) para el control del nivel de un depósito de calibración.

Este proyecto se ha llevado a cabo en colaboración con el departamento de Ingeniería Energética de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), como parte de una beca de colaboración. Nuestro objetivo principal ha sido diseñar y optimizar el control de un banco de ensayos de fluidos ubicado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos, utilizando equipos de la marca Siemens disponibles. El banco cuenta con bombas hidráulicas, caudalímetros, variadores de frecuencia, electroválvulas y válvulas motorizadas.

Las tareas realizadas incluyen recuperar el funcionamiento del banco, desarrollar un programa de control en SIMATIC y PCS7, crear una interfaz de usuario en WinCC, analizar el funcionamiento del banco y diseñar un nuevo guion de prácticas y manual de funcionamiento. Además, se han propuesto mejoras en el diseño actual del banco. También se ha documentado el lenguaje y los protocolos utilizados en el proyecto, así como la propuesta de lazos de control equivalentes a los utilizados en una planta de procesos.

Como demostración de los resultados obtenidos, se han implementado los lazos de control bajo el entorno desarrollado en PCS7 de Siemens.

PALABRAS CLAVE

- Siemens
- PID
- Automatización
- Banco de ensayo
- SFC
- CFC
- Válvula
- Bomba
- Curva característica
- Manual

CÓDIGOS UNESCO

- 3310.03 Procesos industriales
- 3311.02 Ingeniería de Control
- 3311.08 Equipo de laboratorio

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN EJECUTIVO	v
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes y Justificación	1
1.2. Motivación	3
1.3. Objetivos	3
1.4. Estructura de la memoria	4
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Industria 4.0 y su relación con los bancos de ensayo	5
2.2. Trabajos previos relacionados	6
2.3. Tecnologías utilizadas en el proyecto	10
3. METODOLOGÍA	12
3.1. Elementos del banco de ensayo y su funcionamiento	12
3.1.1. Sección estructural	12
3.1.2. Sección hidráulica	13
3.1.3. Sección de control	18
3.1.4. Sistema eléctrico	30
3.1.5. Sistema neumático	31
3.2. Automatización del banco de ensayo	32
3.3. Actualización del manual de funcionamiento	34
3.3.1. Pasos antes de abrir el programa SIMATIC Manager PCS7	34
3.3.2. Pasos para cargar el proyecto en el PLC	40

3.3.3. Desconexión y apagado	58
3.3.4. Resumen etapas	59
3.4. Implementación de lazos de control	59
3.4.1. SFC de arranque	60
3.4.2. CFC de control por PID	64
4. PRUEBAS Y RESULTADOS	73
4.1. Descripción de las pruebas realizadas	73
4.2. Análisis de los resultados obtenidos	74
4.3. Comparación de las curvas características	82
4.4. Interpretación de los datos	86
4.5. Evaluación del funcionamiento del PID	87
5. CONCLUSIONES	96
6. LÍNEAS FUTURAS	97
7. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO	99
8. EVALUACIÓN DE IMPACTOS	103
8.1. Impacto social	103
8.2. Impacto económico	103
8.3. Impacto medioambiental	104
9. ASPECTOS LEGALES Y ÉTICOS	105
10. ALINEACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	106
REFERENCIAS	107
ANEXOS	109
A. Curvas del fabricante y gráficas secundarias	109

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Ventajas y desventajas de la periferia descentralizada.	21
4.1. Bomba 1 individual a 1200rpm.	75
4.2. Bomba 1 individual a 1740rpm.	75
4.3. Bomba 1 individual a 2320rpm.	75
4.4. Bomba 1 individual a 2860rpm.	75
4.5. Bomba 1 individual a 15 % de rendimiento.	76
4.6. Bomba 1 individual a 20 % de rendimiento.	76
4.7. Bomba 1 individual a 25 % de rendimiento.	76
4.8. Bomba 1 individual a 30 % de rendimiento.	76
4.9. Bomba 1 individual a 35 % de rendimiento.	77
4.10. Bomba 1 individual a 40 % de rendimiento.	77
4.11. Bombas en paralelo (Bomba 1 2320rpm y Bomba 2 2320rpm).	77
4.12. Bombas en paralelo (Bomba 1 2320rpm y Bomba 2 2002rpm).	78
4.13. Bombas en serie (Bomba 1 2320rpm y Bomba 2 2002rpm). Bomba 1.	78
4.14. Bombas en serie (Bomba 1 2320rpm y Bomba 2 2002rpm). Bomba 2.	79
4.15. Bomba 1 individual a 1200rpm post-purga.	80
4.16. Bomba 1 individual a 1740rpm post-purga.	81
4.17. Bomba 1 individual a 2320rpm post-purga.	81
4.18. Errores de los ensayos de la bomba frente a ensayos del fabricante.	84
7.1. Presupuesto del proyecto. Materiales y componentes.	100
7.2. Presupuesto del proyecto. Recursos humanos.	100

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Banco de ensayo bombas serie/paralelo 1. <i>Fuente: E.P.</i>	2
1.2. Banco de ensayo bombas serie/paralelo 2. <i>Fuente: E.P.</i>	2
2.1. Vista en 3D del modelo del banco de ensayo. <i>Fuente: [2]</i>	7
2.2. Interfaz gráfica del programa SOLID EDGE ST8. <i>Fuente: [2]</i>	7
2.3. Módulo de estructura en el montaje final. Placas de contrachapado blanco que soportan el resto de elementos del banco. <i>Fuente: E.P.</i>	8
2.4. Localización de las dos bombas reales en la parte baja del banco de ensayo (imagen izquierda) y caudalímetro Coriolis (imagen derecha, junto al depósito). <i>Fuente: E.P.</i>	8
2.5. Cuadro eléctrico instalado. <i>Fuente: E.P.</i>	9
2.6. Tablón deteriorado debido a las fugas del transmisor de presión. Parte superior e inferior. <i>Fuente: E.P.</i>	9
3.1. Modelado 3D de la sección estructural. <i>Fuente: [2]</i>	12
3.2. Vista de la tubería de vaciado y su llave de paso. <i>Fuente: E.P.</i>	13
3.3. Modelado 3D de la subsección de impulsión. <i>Fuente: [5]</i>	14
3.4. Detalle de las placas de características de la bomba. <i>Fuente: E.P.</i>	15
3.5. Modelado 3D de la subsección de calibración. <i>Fuente: [6]</i>	16
3.6. Imagen aérea de la subsección de calibración. <i>Fuente: E.P.</i>	17
3.7. Modelado 3D de la subsección de comprobación. <i>Fuente: [6]</i>	18
3.8. Célula de carga y detalle de sus características. <i>Fuente: E.P.</i>	18
3.9. Diagrama en vista frontal de los elementos de mando del PLC. <i>Fuente: [7]</i>	19
3.10. Autómata y componentes de la periferia descentralizada. <i>Fuente: [2]</i>	20
3.11. Variador de frecuencia G120 CU230P-2_PN. <i>Fuente: [8]</i>	21
3.12. IOP de los variadores de frecuencia (1 - Estado y diagnóstico, 2 - Aviso de tensión de salida, 3 - Aviso de frecuencia de salida, 4 - Menú de selección). <i>Fuente: [9]</i>	22
3.13. Esquema flujo agua en caudalímetro vórtex. <i>Fuente: [11]</i>	23
3.14. Caudalímetro Vórtex instalado en el banco de ensayo. <i>Fuente: E.P.</i>	23
3.15. Ley de Faraday aplicada a caudalímetro electromagnético. <i>Fuente: [12]</i>	24
3.16. Caudalímetro electromagnético instalado en el banco de ensayo. <i>Fuente: E.P.</i>	24
3.17. Principio de funcionamiento del caudalímetro de ultrasonidos. <i>Fuente: [14]</i>	25

3.18. Principio de funcionamiento del caudalímetro coriolis. <i>Fuente: [16]</i>	26
3.19. Caudalímetro coriolis instalado en el banco de ensayo. <i>Fuente: E.P.</i>	26
3.20. Principio de funcionamiento del tubo de venturi con un único líquido. <i>Fuente: [18]</i>	27
3.21. Principio de funcionamiento de la placa de orificio. <i>Fuente: [19] y [5]</i>	27
3.22. Transmisor de presión SITRANS P DS III. <i>Fuente: E.P.</i>	28
3.23. Transmisor de nivel capacitivo Siemens LC 300. <i>Fuente: [23]</i>	29
3.24. Célula de carga SITRANS WL260 SP-S AB. <i>Fuente: [24]</i>	29
3.25. Tarjeta de pesaje SIWAREX WP321. <i>Fuente: [26]</i>	30
3.26. Sistema neumático original (izquierda) y real (derecha). <i>Fuente: [2]</i>	31
3.27. Compresores disponibles en el taller de Mecánica de Fluidos. <i>Fuente: E.P.</i>	32
3.28. Conexión del cable neumático al cable de ensayo. <i>Fuente: E.P.</i>	32
3.29. Interfaz pantalla WinCC modo automático banco de ensayo. <i>Fuente: E.P.</i>	33
3.30. Conexión cable de corriente. <i>Fuente: E.P.</i>	34
3.31. Conexión del compresor. Cable derecho. <i>Fuente: E.P.</i>	35
3.32. Conexión del compresor en el banco. <i>Fuente: E.P.</i>	35
3.33. Detalle conexión del compresor con el banco. <i>Fuente: E.P.</i>	36
3.34. Vista de regleta que da corriente al monitor y la torre del PC. <i>Fuente: E.P.</i>	36
3.35. Detalle diferencial de regleta y compresor. <i>Fuente: E.P.</i>	37
3.36. Cuadro eléctrico del banco de ensayo. <i>Fuente: E.P.</i>	37
3.37. Diferencial activado del banco de ensayo. <i>Fuente: E.P.</i>	38
3.38. PLC. <i>Fuente: E.P.</i>	38
3.39. Detalle del botón de encendido, en ON. <i>Fuente: E.P.</i>	39
3.40. Conexión cable ethernet. <i>Fuente: E.P.</i>	39
3.41. Encendido del PLC. <i>Fuente: E.P.</i>	40
3.42. Icono SIMATIC PCS7. <i>Fuente: E.P.</i>	40
3.43. Abrir proyecto. <i>Fuente: E.P.</i>	41
3.44. Multiprojects. <i>Fuente: E.P.</i>	41
3.45. Component view. <i>Fuente: E.P.</i>	42
3.46. Dirección a Hardware. <i>Fuente: E.P.</i>	42

3.47. Ventana de Hardware. <i>Fuente: E.P.</i>	42
3.48. Botón guardar y compilar(Zoom a la Figura 3.47). <i>Fuente: E.P.</i>	43
3.49. Botón download to module. <i>Fuente: E.P.</i>	43
3.50. Download in STOP mode. <i>Fuente: E.P.</i>	44
3.51. Selección de módulo objetivo. <i>Fuente: E.P.</i>	44
3.52. Dirección IP. <i>Fuente: E.P.</i>	45
3.53. Arrancar el módulo. <i>Fuente: E.P.</i>	45
3.54. Descarga de los esquemas. <i>Fuente: E.P.</i>	46
3.55. Ventana download. <i>Fuente: E.P.</i>	46
3.56. Aviso de descarga. <i>Fuente: E.P.</i>	47
3.57. Reinicio de la CPU. <i>Fuente: E.P.</i>	47
3.58. Ventana de logs. <i>Fuente: E.P.</i>	48
3.59. Posible ventana emergente de Download. <i>Fuente: [5]</i>	49
3.60. Dirección de puesta en marcha en Component View. <i>Fuente: E.P.</i>	49
3.61. Interfaz inicial STARTER. <i>Fuente: E.P.</i>	50
3.62. Conexión de los variadores de frecuencia. <i>Fuente: E.P.</i>	50
3.63. Ventana final de conexión de variador. <i>Fuente: E.P.</i>	51
3.64. STARTER. <i>G120Gris</i> y <i>G120Negro</i> conectados. Icono verde. <i>Fuente: E.P.</i>	51
3.65. Proceso de aceptación de los errores. <i>Fuente: E.P.</i>	52
3.66. Variador de frecuencia. <i>Fuente: E.P.</i>	53
3.67. Establecimiento del modo de operación. <i>Fuente: E.P.</i>	53
3.68. Arranque en caliente. <i>Warm Restart</i> . <i>Fuente: E.P.</i>	54
3.69. Ventana que aparece al seguir este punto, con el PLC en RUN. <i>Fuente: E.P.</i>	54
3.70. Pasos para abrir WinCC. <i>Fuente: E.P.</i>	55
3.71. Activar WinCC. <i>Fuente: E.P.</i>	55
3.72. Pasos para aceptar los avisos que suceden al ejecutar WinCC. <i>Fuente: E.P.</i>	57
3.73. Pasos para aceptar los avisos que suceden al ejecutar WinCC. <i>Fuente: E.P.</i>	58
3.74. Botón «deactivate» en WinCC Explorer. <i>Fuente: E.P.</i>	59
3.75. SFC dentro de la carpeta de Esquemas en la <i>component view</i> . <i>Fuente: E.P.</i>	61

3.76. Vista general del proceso secuencial. <i>Fuente: E.P.</i>	62
3.77. Acción de apertura de la Válvula 03. <i>Fuente: E.P.</i>	63
3.78. Condición de « <i>feedback open</i> » de la válvula 03. <i>Fuente: E.P.</i>	63
3.79. Botón del SFC en la interfaz de WinCC. <i>Fuente: E.P.</i>	64
3.80. SFC de secuencia de arranque en funcionamiento. <i>Fuente: E.P.</i>	64
3.81. CFC dentro de la pantalla «Banco_Practicas». <i>Fuente: E.P.</i>	65
3.82. Esquema de control básico de célula de carga y válvula de mariposa mediante PID. <i>Fuente: E.P.</i>	66
3.83. Vista general del proceso de control del PID. <i>Fuente: E.P.</i>	67
3.84. Conexión de la salida de la célula de carga con el <i>Process Value</i> del PID. <i>Fuente:</i> <i>E.P.</i>	68
3.85. Conexión de la entrada de la válvula de mariposa con el <i>Manipulated Variable</i> del PID. <i>Fuente: E.P.</i>	69
3.86. Valores límite de la célula de carga (PV). <i>Fuente: E.P.</i>	69
3.87. Botón del CFC en la interfaz de WinCC. <i>Fuente: E.P.</i>	70
3.88. Ventana <i>Home</i> del PID. PV, SP y MV. <i>Fuente: E.P.</i>	70
3.89. Parámetros de ajuste del PID. <i>Fuente: E.P.</i>	71
3.90. Configuración de los parámetros de la válvula de mariposa. <i>Fuente: E.P.</i>	72
3.91. Ecuaciones vaciado depósito. <i>Fuente: E.P.</i>	72
4.1. Imagen detalle de uno de los purgadores de las tuberías PT100. <i>Fuente: E.P.</i>	80
4.2. Comparación curvas bomba 1 a diferentes regímenes de giro con el fabricante. <i>Fuente: E.P.</i>	83
4.3. Ensayos para las curvas de isorendimiento. <i>Fuente: E.P.</i>	84
4.4. Bombas en paralelo frente a fabricante. <i>Fuente: E.P.</i>	84
4.5. Bombas en serie frente a fabricante. <i>Fuente: E.P.</i>	85
4.6. Comparación curvas bomba 1 a diferentes regímenes de giro con el fabricante, después de purgar de aire el sistema. <i>Fuente: E.P.</i>	85
4.7. Gradientes de la pendiente en función rampa. <i>Fuente: E.P.</i>	88
4.8. Parámetros primer ajuste. <i>Fuente: E.P.</i>	89
4.9. Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1450 rpm, Ganancia 3, TI 60 s. Paso de 2 kg a 6 kg en el depósito. <i>Fuente: E.P.</i>	89

4.10. Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1450 <i>1450</i> , Ganancia 3, TI 60 s. Paso de 6 kg a 1 kg en el depósito. <i>Fuente: E.P.</i>	90
4.11. Parámetros segundo ajuste. <i>Fuente: E.P.</i>	91
4.12. Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1740 <i>rpm</i> , Ganancia 2, TI 100 s. Paso de 2 kg a 7 kg en el depósito. <i>Fuente: E.P.</i>	91
4.13. Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1740 <i>rpm</i> , Ganancia 2, TI 100 s. Paso de 7 kg a 2 kg en el depósito. <i>Fuente: E.P.</i>	92
4.14. Parámetros tercer ajuste. <i>Fuente: E.P.</i>	92
4.15. Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1740 <i>rpm</i> , Ganancia 2, TI 600 s. Paso de 2 kg a 7 kg en el depósito. <i>Fuente: E.P.</i>	93
4.16. Parámetros cuarto ajuste. <i>Fuente: E.P.</i>	93
4.17. Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1200 <i>rpm</i> , Ganancia 2.3, TI 240 s. Paso de 2 kg a 7 kg en el depósito. <i>Fuente: E.P.</i>	94
4.18. Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1200 <i>rpm</i> , Ganancia 2.3, TI 240 s. Paso de 7 kg a 2 kg en el depósito. <i>Fuente: E.P.</i>	94
4.19. Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Escalón. Bomba 1200 <i>rpm</i> , Ganancia 2.3, TI 240 s. Paso de 2 kg a 7 kg en el depósito. <i>Fuente: E.P.</i>	95
4.20. Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Bomba 1200 <i>rpm</i> , Ganancia 2.3, TI 240 s. Escalón. Paso de 7 kg a 2 kg en el depósito. <i>Fuente: E.P.</i>	95
A.1. Gráfica fabricante a 1200 <i>rpm</i> . Altura y rendimiento. <i>Fuente: [4]</i>	109
A.2. Gráfica fabricante a 1740 <i>rpm</i> . Altura y rendimiento. <i>Fuente: [4]</i>	110
A.3. Gráfica fabricante a 2320 <i>rpm</i> . Altura y rendimiento. <i>Fuente: [4]</i>	110
A.4. Gráfica fabricante a 2860 <i>rpm</i> . Altura y rendimiento. <i>Fuente: [4]</i>	111
A.5. Bomba 1 individual a 1200 <i>rpm</i> frente al fabricante. <i>Fuente: E.P.</i>	111
A.6. Bomba 1 individual a 1740 <i>rpm</i> frente al fabricante. <i>Fuente: E.P.</i>	112
A.7. Bomba 1 individual a 2320 <i>rpm</i> frente al fabricante. <i>Fuente: E.P.</i>	112
A.8. Bomba 1 individual a 2860 <i>rpm</i> frente al fabricante. <i>Fuente: E.P.</i>	112
A.9. Rendimientos de la bomba 1 para los cuatro regímenes de giro. <i>Fuente: E.P.</i> . . .	113

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo en constante evolución, la innovación tecnológica se convierte en un motor de progreso para la industria, permitiendo aumentar la capacidad de producción, flexibilidad, optimización, calidad y seguridad. Una muestra de ello es el proyecto llevado a cabo en el departamento de Ingeniería Energética la ETSII de la UPM. En colaboración con Siemens, se ha creado un banco de ensayo de bombas automatizado que permitirá a los estudiantes de Mecánica de Fluidos II y Máquinas Hidráulicas y Eólicas, aprender de manera práctica sobre el comportamiento de las bombas y el flujo de agua en circuitos, utilizando tecnología de última generación. Este banco de ensayo ha enfrentado desafíos significativos, pero finalmente se ha logrado su plena funcionalidad y se espera que sea una herramienta invaluable para el aprendizaje y formación de los futuros ingenieros en la Universidad.

1.1. Antecedentes y Justificación

El proyecto de diseño y construcción del banco de ensayos de fluidos se inició en el año 2014 con la creación de un modelo 3D del banco. Tras la adquisición de las piezas necesarias, se procedió a su montaje y a la instalación de los medidores e instrumentos de Siemens. En años posteriores, se trabajó en la programación de la automatización del banco, así como en la implementación de elementos de seguridad, entre otros aspectos. Sin embargo, el funcionamiento del banco presentó fallos, lo que llevó a realizar ajustes y puesta a punto en varias ocasiones. Finalmente, otro alumno logró dejar el banco casi operativo en 2019, antes de la pandemia de COVID-19. No obstante, tras estar parado durante tres años, el banco necesitó ser revisado y puesto a punto nuevamente por el autor del presente TFM. Durante el desarrollo del proyecto, se encontraron deficiencias en el manual de funcionamiento, lo que dificultaba el correcto desempeño por parte del usuario para el uso del banco de ensayo en distintas condiciones de operación. Asimismo, se observaron fallas en los elementos físicos del banco, que impedían su óptimo funcionamiento. Debido a estas circunstancias, se ha tenido que realizar una puesta a punto prácticamente desde cero, a fin de garantizar su correcto funcionamiento en todas las condiciones de operación previstas. Este banco también se presenta como un sustituto de otros más desfasados.

En el taller hay actualmente dos bancos de ensayo más (Figuras 1.1 y 1.2) que cumplen la misma función que el banco de ensayo que se estudia en este trabajo, aunque son más antiguos y pequeños, y no cuentan con un sistema de control distribuido.



Figura 1.1: Banco de ensayo bombas serie/paralelo 1. Fuente: E.P.



Figura 1.2: Banco de ensayo bombas serie/paralelo 2. Fuente: E.P.

Estos bancos también tienen una conexión con ordenador que permite obtener los valores de altu-

ra manométrica y caudal del proceso. Se encuentran programados en WindowsXP, y el objetivo futuro será virtualizar el sistema de toma de datos.

1.2. Motivación

La motivación principal del proyecto es el diseño y puesta a punto de un banco de ensayos de fluidos para su uso en las asignaturas de Mecánica de Fluidos II y Máquinas Hidráulicas y Eólicas.

Se dispone de una oportunidad única para trabajar con un sistema de control real que se emplea a día de hoy en múltiples industrias. Tanto los elementos mecánicos como las electroválvulas o las bombas, así como los buses de campo, el autómata, y la programación de SIEMENS (Simatic, WinCC, . . .) se utilizan en plantas de proceso por todo el mundo. Tener la posibilidad de ver un entorno de trabajo actualizado y funcional en el laboratorio de prácticas de Mecánica de Fluidos permitirá a los alumnos mejorar su formación y valorar aquello que verdaderamente se emplea en la industria, y a la universidad ganar calidad en el desarrollo de las asignaturas relacionadas con el banco.

De hecho, el contar con un sistema de control permite compartir el uso del banco de ensayo con el Centro de Automática y Robótica de la UPM, pudiendo así ampliar la oferta de prácticas no enfocadas a sistemas hidráulicos, sino focalizadas a sistemas de eutomatización y control de proceso / planta.

1.3. Objetivos

El objetivo de este proyecto es proporcionar a los estudiantes una herramienta educativa práctica para el aprendizaje y la comprensión de los principios de la mecánica de fluidos en la industria, y fomentar su interés en el campo de la ingeniería energética. Además, la automatización y control del banco de ensayos utilizando equipos SIEMENS y el diseño de un nuevo manual de funcionamiento y arranque del banco de ensayo, muestran una clara orientación hacia la mejora y actualización constante del sistema para garantizar su eficiencia y eficacia en la enseñanza. Por lo tanto, los objetivos que se desarrollan en este trabajo, por orden cronológico, son los siguientes:

1. Análisis detallado de las condiciones iniciales del banco de ensayo, con el fin de entender su situación y determinar las áreas que necesitan mejoras.
2. Actualización del manual de funcionamiento, para poder ser interpretado de manera fácil por usuarios no experimentados en el software SIMATIC ni en el manejo de autómatas.
3. Puesta a punto del banco de ensayo, de manera que todos sus elementos funcionen coordinadamente y puedan interpretarse los datos de los medidores de presión y caudalímetros.
4. Comparación de las curvas características de las bombas del banco de ensayo con las proporcionadas por el fabricante, para garantizar la exactitud de los datos medidos.
5. Realización y creación de un curso y manual de uso de SIMATIC, para poder transmitir el conocimiento a futuros alumnos que necesiten trabajar con este banco de ensayo.
6. Implementación de lazo de control. Esto incluye el control de eventos discretos para los procesos de arranque mediante SFCs y control de procesos continuos del tipo PID.

Además de los objetivos mencionados, este proyecto también busca promover la mejora de la eficiencia energética del banco de ensayos. Para ello, se busca diseñar un sistema de control de la velocidad de las bombas, que permite ajustar el caudal de manera más precisa y eficiente, y reducir así el consumo de energía. Asimismo, se realizarán mediciones de potencia y rendimiento en diferentes condiciones de operación, con el fin de identificar posibles mejoras en la eficiencia del sistema. De esta manera, se espera contribuir a la formación de futuros ingenieros comprometidos con el desarrollo sostenible y la optimización de los procesos industriales.

1.4. Estructura de la memoria

Esta memoria está dividida en seis capítulos principales, y un apartado de anexos donde se completará la información de éstos. En la introducción, se ha hablado del contexto y motivación del proyecto, así como de los objetivos del mismo. En el estado del arte, se hablará de la relación entre la industria 4.0 y los bancos de ensayo, y se presentarán trabajos previos relacionados con las tecnologías utilizadas en el proyecto. Además, se incluirá una sección dedicada a la teoría de las comunicaciones utilizadas en el proyecto, como el profibus y otras tecnologías de Siemens.

En el apartado de Metodología se explicará el diseño del banco de ensayo, sus elementos y funcionamiento. También se explicará la automatización del banco de ensayo y cómo se ha actualizado su uso y programación. En el apartado de Pruebas y resultados se detallará una descripción de las pruebas realizadas y se presentará un análisis de los resultados obtenidos. Se compararán las curvas características de las bombas presentes en el banco (de manera individual, en serie y en paralelo) con las del fabricante. Se interpretarán también los datos medidos con los medidores de presión y caudalímetros.

En el capítulo de conclusiones se presentará un resumen de los objetivos alcanzados, así como la evaluación del proyecto y su impacto en la formación académica del autor y de futuros posibles alumnos. Se presentan las limitaciones y dificultades encontradas durante el desarrollo del proyecto y se propondrán sugerencias para trabajos relacionados en la sección de Líneas futuras, que incluirá propuestas de mejoras y ampliaciones del proyecto.

Por último, en los anexos se mostrarán diagramas y gráficas secundarias, y todo aquello que haya sido empleado en el desarrollo de este trabajo.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Industria 4.0 y su relación con los bancos de ensayo

La Industria 4.0 representa una revolución (aunque ya se empieza a hablar de Industria 5.0) que fusiona técnicas avanzadas de producción y operaciones con tecnologías inteligentes que se integrarán en organizaciones, personas y activos [1]. Este cambio es impulsado por la aparición de nuevas tecnologías, como la robótica, el análisis de datos, la inteligencia artificial, la nanotecnología y el Internet de las cosas (IoT), entre otras. Para aprovechar las oportunidades que trae consigo la Industria 4.0, las empresas deben identificar las tecnologías que mejor satisfacen sus necesidades y hacer inversiones estratégicas en ellas. Aquellas que no comprendan los cambios y oportunidades de la Industria 4.0, corren el riesgo de perder su cuota de mercado.

Es fundamental comprender el enorme potencial que la cuarta revolución industrial ofrece, ya que su alcance va más allá de los procesos de producción. Esta revolución afectará a todas las industrias, sectores y, en última instancia, a la sociedad en general. La cuarta revolución industrial ofrece la oportunidad de optimizar las operaciones de las empresas, impulsar el crecimiento de los ingresos y transformar los productos, la cadena de suministro y las expectativas de los clientes. Es probable que esto cambie la forma en que hacemos las cosas y también podría afectar a cómo los clientes interactúan con las empresas, y las experiencias que esperan tener al hacerlo. Además, esto podría dar lugar a cambios en la fuerza laboral, lo que requeriría la adquisición de nuevas capacidades y roles.

La llegada de la Industria 4.0 conlleva una oportunidad única para potenciar las operaciones empresariales, incrementar los ingresos y transformar los productos, la cadena de suministro y las expectativas de los clientes. Esta nueva revolución industrial ofrece una amplia gama de tecnologías innovadoras que pueden ser aprovechadas por las empresas para optimizar su rendimiento y mejorar su posicionamiento en el mercado. Además, la adopción de estas tecnologías también tiene el potencial de crear nuevas formas de interactuar con los clientes y de crear productos y servicios completamente nuevos. El uso de sensores y dispositivos portátiles están logrando mejoras en los productos de diversas maneras. Estos cambios en los productos se traducen en cambios en la cadena de suministro y, por ende, en los clientes.

La Industria 4.0 tiene impactos significativos a diferentes niveles, desde grandes ecosistemas hasta un nivel individual en empleados y clientes:

- **Ecosistemas:** La Industria 4.0 no transforma únicamente la forma en que las empresas operan y producen bienes, sino que también afecta a todos los agentes del ecosistema, incluyendo proveedores, clientes, inversores y terceros. Gracias a las tecnologías que impulsan la Industria 4.0, es posible establecer interacciones entre cada punto de la red industrial.
- **Organizaciones:** La capacidad de ajustarse a los datos que se toman en tiempo real, y aprender de ellos, hace que las organizaciones sean más receptivas y proactivas. Además, estas tecnologías permiten a las organizaciones reducir sus riesgos en términos de productividad.
- **Individuos.** La Industria 4.0 tiene implicaciones diversas para los individuos. Para los empleados, puede significar un cambio en el trabajo que realizan, mientras que para los clientes puede significar una mayor personalización de los productos y servicios que satisfacen mejor sus necesidades.

En el entorno de trabajo que se desarrolla en este proyecto, es fundamental comprender el papel

de la industria 4.0. Como se ha comentado, el avance tecnológico es un punto decisivo en el progreso de una empresa. La Industria 4.0 no se limita a la producción, y busca digitalizar e interconectar todo el proceso, desde el diseño hasta la fabricación de los productos. Para lograr esto, apuestan por el uso de gemelos digitales, que permiten simular de forma realista la planta y el proceso, lo que facilita la gestión de incidencias, el control de los stocks y la calidad, así como el entrenamiento de los operadores de la sala de control para mejorar la seguridad de las plantas. Este enfoque ofrece una gran cantidad de beneficios, como la capacidad de producir productos únicos en tiempo récord, como si de un producto producido a gran escala se tratase. También es de destacar la optimización del consumo de recursos, energía y tiempo, y el aumento de la productividad, lo que supone reducir tanto los costes de producción como los de desarrollo. Además, este proceso se asocia con un aumento en la ciberseguridad industrial para proteger los sistemas utilizados.

Sin embargo, antes de que la implementación de la Industria 4.0 se convierta en una realidad, se deben abordar varios desafíos. Uno de ellos es lograr que todos los fabricantes de componentes y bienes de equipo se pongan de acuerdo en aplicar los mismos estándares de comunicación y conexiones físicas, para poder utilizar productos de distintos fabricantes en la construcción o digitalización de la industria. Otro reto es la creación de las herramientas de software y técnicas de procesamiento necesarias para manejar grandes cantidades de información requeridas en la comunicación de todos los elementos.

2.2. Trabajos previos relacionados

El banco de pruebas objeto de estudio en el presente trabajo ha sido sometido a una rigurosa investigación en el departamento durante varios años. Diversos alumnos han abordado su proyecto de fin de máster o grado, colaborando de manera progresiva en la construcción y validación de los distintos componentes que conforman dicho banco.

Con el propósito de alcanzar el objetivo deseado, se inició un acercamiento con Siemens para establecer metas de trabajo en conjunto. A continuación, se llevó a cabo el diseño y desarrollo de un modelo 3D minucioso del banco de pruebas utilizando el software SOLID EDGE ST8 de Siemens, tal como se muestra en la figura 2.2, con miras a su fabricación física.

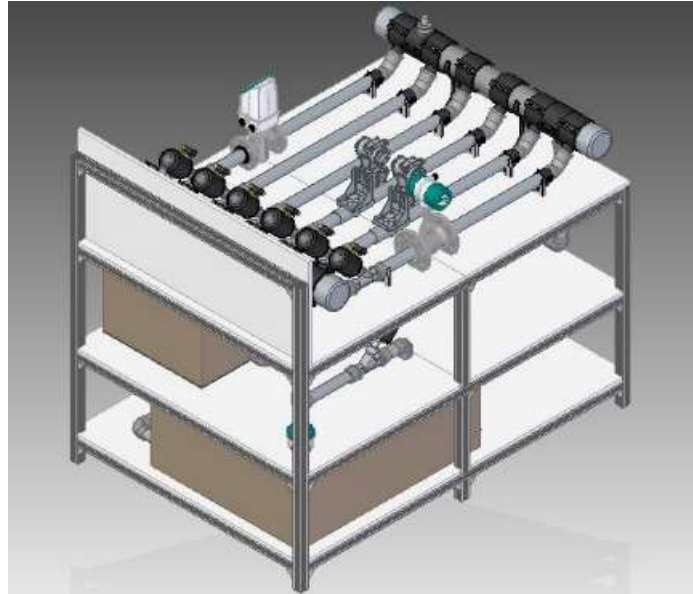


Figura 2.1: Vista en 3D del modelo del banco de ensayo. Fuente: [2]

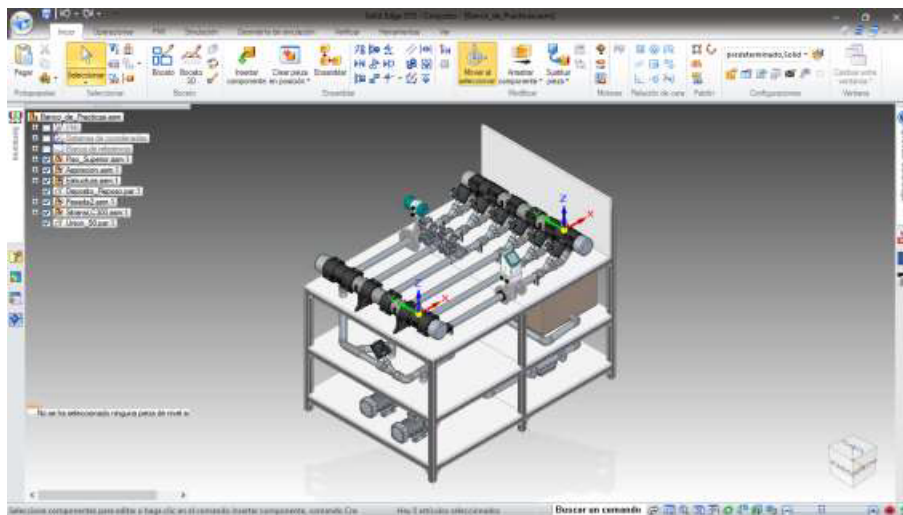


Figura 2.2: Interfaz gráfica del programa SOLID EDGE ST8. Fuente: [2]

Sin embargo, el proceso de ensamblaje de las piezas no fue del todo sencillo. Como suele ocurrir, el salto del diseño en ordenador al trabajo real presentó ciertos inconvenientes que afectaron el avance del trabajo en el banco. El proceso secuencial se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Montaje del Módulo Estructura: es responsable de albergar al resto de los módulos. En un principio, la estructura estaba diseñada sin ruedas, pero después de evaluar las dimensiones y el peso del sistema, se decidió agregar seis ruedas para permitir la movilidad del modelo en caso de ser necesario.



Figura 2.3: Módulo de estructura en el montaje final. Placas de contrachapado blanco que soportan el resto de elementos del banco. *Fuente: E.P.*

2. Montaje de la Sección de Calibración.
3. Montaje Sección de Absorción.



Figura 2.4: Localización de las dos bombas reales en la parte baja del banco de ensayo (imagen izquierda) y caudalímetro Coriolis (imagen derecha, junto al depósito). *Fuente: E.P.*

4. Montaje de la Sección de Comprobación. Después de completar la instalación hidráulica, se procedió a la instalación de los componentes del Sistema Neumático.
5. Instalación del cuadro eléctrico y el cableado electrónico y de alimentación de todo el sistema.

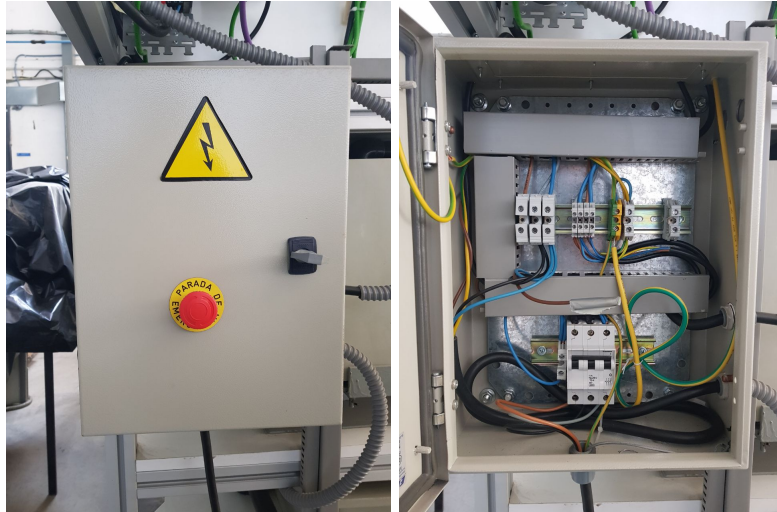


Figura 2.5: Cuadro eléctrico instalado. *Fuente: E.P.*

Es importante destacar los inconvenientes generados por el uso de los adhesivos que se encargan de sellar las tuberías entre sí y con los codos de las mismas. El tratamiento de los adhesivos no se tuvo en cuenta adecuadamente en cuanto a la conservación y las técnicas de aplicación. Como resultado, a pesar del cuidado aplicado en los procesos, las primeras secciones presentaron fugas durante las pruebas de estanqueidad, lo que requirió la reconstrucción completa de la Sección de Calibración. Además, en el año en que se lleva a cabo este trabajo, han vuelto a surgir algunas fugas en el sistema. Estas fugas han provocado el levantamiento de los tableros de madera, y ha sido necesario quitar uno de los elementos que componen la sección de calibración para que no continúen estas fugas.



Figura 2.6: Tablón deteriorado debido a las fugas del transmisor de presión. Parte superior e inferior. *Fuente: E.P.*

Una vez ensamblados todos los componentes mecánicos y eléctricos, se procedió al diseño del software del banco, así como el gemelo digital, lo que permitió la automatización de los procesos de prueba. Un gemelo digital es una representación digital de un sistema físico en tiempo real. En el contexto de la programación de Siemens con SIMATIC y WINCC, se refiere a la creación de un modelo virtual de una máquina o proceso industrial utilizando herramientas de software como el SIMATIC S7-PLCSIM ADVANCED y el WINCC RUNTIME ADVANCED. El gemelo digital permite simular y probar el comportamiento del sistema en un entorno controlado y seguro antes de su implementación en la vida real. Esto puede ayudar a reducir el tiempo y los costos de desarrollo, minimizar el riesgo de errores y problemas de seguridad, y mejorar la eficiencia y la

calidad del sistema en general. Además, una vez implementado el sistema, el gemelo digital puede seguir utilizándose para el monitoreo y análisis en tiempo real del comportamiento de la máquina o proceso, permitiendo la identificación temprana de problemas y la optimización continua del rendimiento.

Por último, se implementaron medidas de seguridad en el control del banco para evitar posibles daños causados por un uso indebido de los elementos. Un esquema del sistema hidráulico puede verse en la Figura 3.29.

2.3. Tecnologías utilizadas en el proyecto

En este apartado se explicará de manera genérica las tecnologías que se emplean en el proyecto, con el objetivo de comprender mejor las bases teóricas que sustentan el banco de ensayo. En la sección siguiente (Metodología 3) se presentarán más en detalle los componentes del banco de ensayo.

- **DCS:** Un DCS o Sistema de Control Distribuido (por sus siglas en inglés *Distributed Control System*, es una plataforma de automatización utilizada en procesos industriales para controlar y supervisar el funcionamiento de múltiples dispositivos y procesos en una planta. Se compone de un conjunto de controladores de proceso distribuidos en la planta, conectados a través de una red de comunicación y que trabajan en conjunto para controlar y monitorizar distintos aspectos del proceso. Los DCS permiten una mayor eficiencia en la gestión y control de procesos industriales, ya que la información se puede centralizar y monitorizar desde un único punto de control. Además, suelen contar con herramientas de diagnóstico y análisis que permiten detectar problemas y fallos en el proceso en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones y la implementación de soluciones rápidas.

En este caso, el conjunto de autómatas, bus de campo, software de control y sensores componen el DCS que se controla desde el programa SIMATIC, y que puede visualizarse de manera gráfica y cómoda en WinCC.

- **Redundancia:** El autómata del que se dispone en el banco trabaja empleando esta tecnología. Se trata de un sistema con dos unidades centrales de procesamiento (CPU) idénticas dentro del único DCS, que trabajan en paralelo con el mismo programa y procesan los mismos datos. Las dos CPU están sincronizadas por dos conexiones redundantes, de tal forma que si una de ellas falla, la otra toma el control del proceso automáticamente. En el banco de ensayo también se presenta redundancia en las conexiones, lo que asegura que en el caso de fallo de uno de los cables, el sistema puede seguir funcionando, asegurando la robustez del proceso. Para el uso que se le da en el taller, esto no es crítico, pero en una industria real puede ser clave para la productividad de la misma, pues da la oportunidad de solventar un error sin parar el proceso por completo.
- **Profibus:** El sistema Profibus es un sistema de comunicación en serie basado en el estándar de comunicación RS-485 [3]. Esta red cuenta con maestros (PLCs, PACs o DCSs) y esclavos (motores, sensores, actuadores, ...). Este sistema se basa en la recolección de diferentes entradas y salidas en un único dispositivo de E/S local, que luego enviará los datos al maestro a través de un sólo cable (tipología bus). Esto simplifica enormemente la instalación y su mantenimiento. Dentro de esta tecnología, existen dos tipos de redes:
 - **Profibus DP** (Profibus de periferia descentralizada). Está diseñado para sustituir a la transmisión de señales en paralelo con 24V y a la transmisión HART en la automatización. Es comúnmente utilizado en sistemas de automatización industrial y

emplea la interfaz estándar de la capa física de comunicación RS-485 o fibra óptica para transmitir información.

- **Profibus PA** (Profibus de proceso de automatización). Emplea el mismo protocolo que Profibus DP, pero con una capa física distinta llamada MBP (*Manchester Bus Powered*). Es un protocolo diseñado para áreas que necesiten una gran seguridad física.
- **Profinet**: Basada en la tecnología Ethernet estándar. En estas redes, se pueden usar cables Ethernet, aunque también existen cables homónimos más resistentes diseñados para soportar ambientes industriales. Al igual que en redes Profibus, una red Profinet está formada por maestros y esclavos y ofrece la opción de utilizar mecanismos de E/S distribuidos para ahorrar cables en la instalación. Esta tecnología permite todas las topologías de conexión (línea, anillo, árbol, ...). Una característica destacada de Profinet es que se basa en la misma estructura que las comunicaciones de la red, como Internet. Esto permite la configuración y el mantenimiento de la red desde cualquier lugar del mundo, siempre y cuando los sensores y actuadores estén conectados a través de Profinet. Sin embargo, esta accesibilidad también puede representar una desventaja, ya que permite a externos sabotear el sistema productivo de la planta. Actualmente, se están desarrollando numerosas aplicaciones y técnicas para cifrar y proteger las plantas.
- **Gemelo digital**: Un gemelo digital (digital twin en inglés) es una réplica virtual de un objeto físico, proceso o sistema. En el caso del banco de ensayo estudiado, se ha realizado en WINCC una representación digital precisa y detallada que refleja su comportamiento, características y funcionalidad en el mundo real. Éste se utiliza para simular, analizar y predecir el rendimiento del banco de ensayo, visto desde una cómoda interfaz gráfica, lo que permite a los usuarios comprender mejor su comportamiento. Un esquema de la conexión de los componentes del banco de ensayo puede verse en el apartado de Hardware (Figura 3.47) de SIMATIC Manager.

3. METODOLOGÍA

3.1. Elementos del banco de ensayo y su funcionamiento

El banco de prácticas consta de tres secciones: estructural, hidráulica y control. Además, cuenta con un conjunto de tuberías, válvulas y cables que integran el sistema neumático y eléctrico.

En cuanto al software, se utilizaron diferentes programas como SIMATIC MANAGER, STARTER y WINCC. Para la configuración de la tarjeta de pesaje se empleó SIWATOOL.

3.1.1. Sección estructural

La disposición física de las secciones que componen el banco requiere una estructura que las soporte y permita la fácil visualización de los componentes. La estructura final del banco de prácticas consiste en tres bancadas de madera sobre una estructura de perfiles de aluminio con ruedas para su movilidad. Además, se ha creado un panel de madera recubierto con perfiles de aluminio y una lámina de PVC transparente para colocar la estación de automatización y facilitar su uso independientemente del módulo hidráulico. En el panel inferior se ubican el depósito principal y las bombas, en el intermedio el depósito de comprobación y la válvula de mariposa, y en el superior los ramales de los igualadores de presión. Se muestra a continuación, en la Figura 3.1, el modelo 3D de la sección estructural del banco de ensayo.

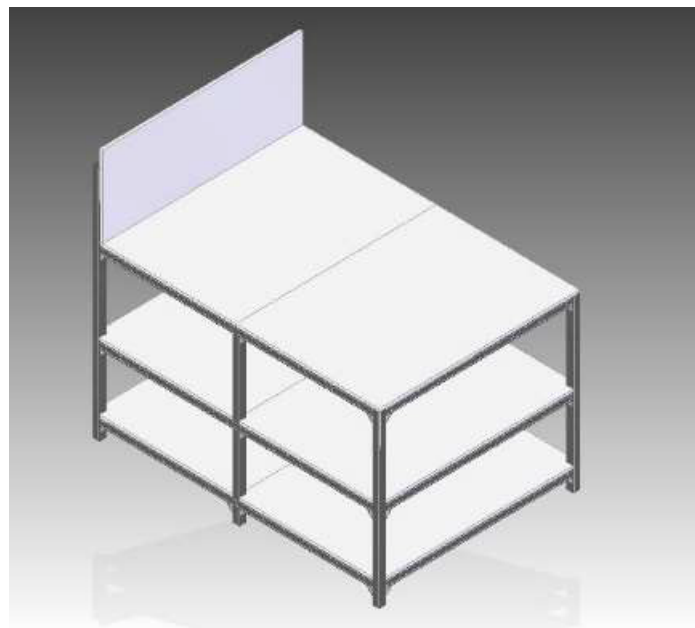


Figura 3.1: Modelado 3D de la sección estructural. Fuente: [2]

El armazón se compone de cuatro elementos principales: la sección de control, la sección hidráulica, el sistema eléctrico y el sistema neumático. La estructura tiene dos entradas y una salida, siendo las entradas la toma de corriente para el sistema eléctrico y la toma neumática para una línea con un mínimo de 7.5 bar de presión. La salida es la llave manual para vaciar el depósito de reposo.



Figura 3.2: Vista de la tubería de vaciado y su llave de paso. *Fuente: E.P.*

La forma del almacén está determinada por las tuberías y bombas que componen la sección hidráulica, formada por tres pisos, y la de control, que se encuentra en la pared vertical del banco. El cuadro eléctrico (que puede verse en la Figura 2.5) está protegido contra posibles fugas del sistema hidráulico y no tiene agujeros por los que pueda entrar líquido en su interior.

3.1.2. Sección hidráulica

La sección hidráulica del proyecto consta de varios componentes esenciales, tales como tuberías, depósitos, codos, electroválvulas y bombas centrífugas, los cuales están interconectados para formar la instalación hidráulica de la planta. Esta sección se divide en tres subsecciones de gran importancia: la subsección de impulsión, la subsección de calibración y la subsección de comprobación, cada una con funciones específicas que se detallarán en los párrafos siguientes.

▪ Subsección de impulsión:

En la sección de impulsión se genera el flujo de agua, produciendo la diferencia de presión del fluido a través de las tuberías. Está compuesta por dos bombas centrífugas idénticas (modelo CM 10-2 A-R-A-E-AVBE F-A-A-N Grundfos [4]). Estas bombas están conectadas a tres electroválvulas normalmente cerradas, que permiten elegir si se desea utilizar las bombas en serie, en paralelo o de manera individual, lo que permite variar las condiciones de funcionamiento de la maqueta y ajustar las variables del flujo. Se explicará en más detalle el control de estas válvulas en la sección 3.2. Al final de esta sección se encuentra una válvula de mariposa de apertura variable ¹. El agua proviene de un depósito abierto de metal con una capacidad de 300 litros. En la Figura 3.3 se puede observar un modelo 3D de la sección de impulsión, así como un depósito y dos elementos de instrumentación que se describirán más adelante.

¹Es decir, analógica. No se trata de una válvula todo o nada. Puede regularse entre apertura 100% y 0% dependiendo de la potencia del compresor empleado para el sistema neumático

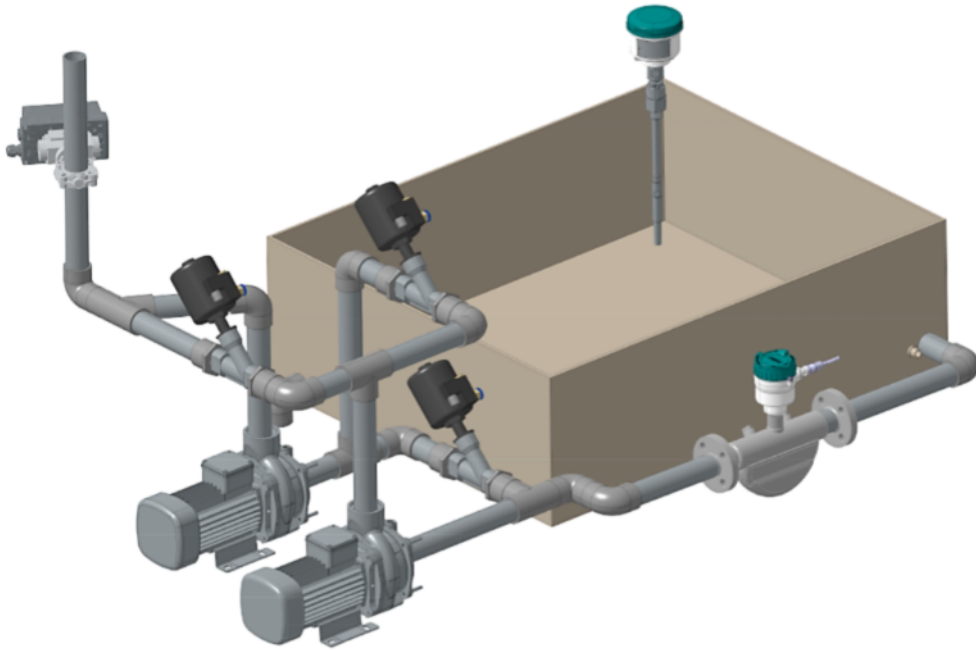


Figura 3.3: Modelado 3D de la subsección de impulsión. *Fuente: [5]*

Las bombas utilizadas se pueden ver en la Figura 2.4. A continuación se muestra una imagen que permite ver en más detalle a las mismas:

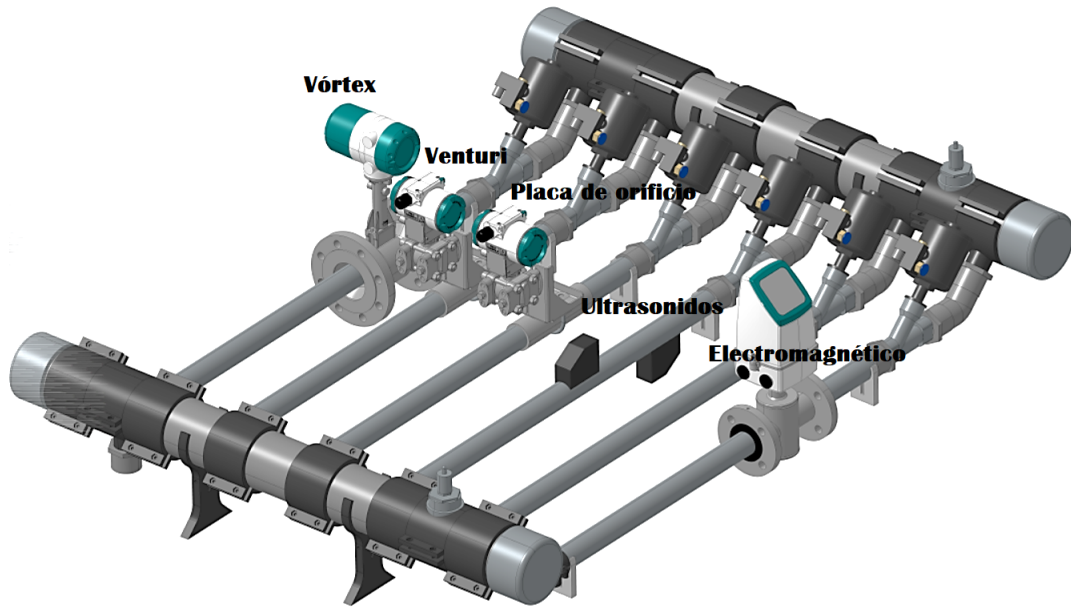


Figura 3.5: Modelado 3D de la subsección de calibración. *Fuente: [6]*

Se muestra a continuación una imagen que permite ver, en vista aérea, la subsección de calibración real².

²Se encuentra un transmisor de presión desconectado de su ramal porque presenta pérdidas de agua.



Figura 3.6: Imagen aérea de la subsección de calibración. *Fuente: E.P.*

■ **Subsección de comprobación:**

Tras salir del segundo igualador de presiones, el caudal de agua tiene dos posibles caminos. El primero, que es el que se utiliza por defecto, lleva el agua directamente al depósito de partida. El segundo camino, que se puede seleccionar mediante la activación o desactivación de las electroválvulas, conduce el agua a un depósito de 100l equipado con una célula de carga para medir el caudal en función del tiempo y el peso del agua almacenada. Una vez se realiza la medición, el depósito de 100l se vacía hacia el depósito de partida para completar el ciclo del agua en la maqueta. Este último circuito se puede observar en la Figura 3.7.

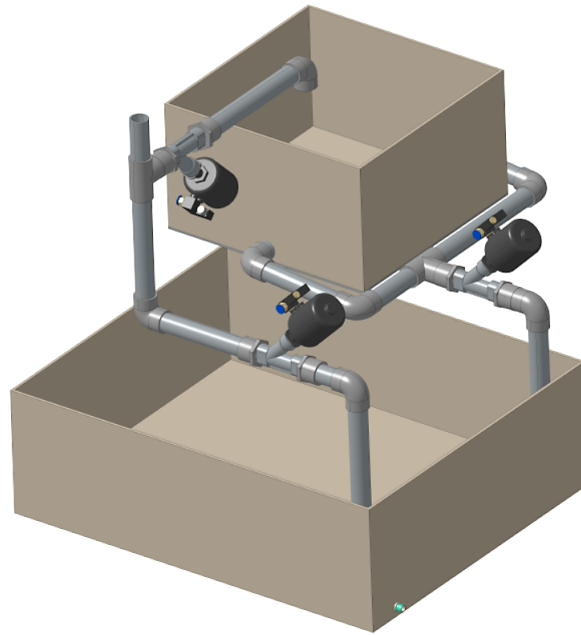


Figura 3.7: Modelado 3D de la subsección de comprobación. *Fuente: [6]*

Para comprobar que el caudal es el correcto, se utiliza una célula de carga encargada de pesar el agua que se almacena en el depósito superior. Por otro lado, el operario ha de medir el tiempo que está circulando agua por la instalación, para poder obtener el caudal a partir de peso (volumen) y tiempo. Se muestra en la Figura 3.24 la célula de carga en su lugar de trabajo, pesando el depósito más pequeño (La célula de carga puede tararse desde la interfaz de WINCC.).



Figura 3.8: Célula de carga y detalle de sus características. *Fuente: E.P.*

3.1.3. Sección de control

En el presente apartado se explicarán los elementos que integran el control del banco de ensayo, así como también los conceptos teóricos que definen el funcionamiento de cada uno de estos componentes. Asimismo, se hace hincapié en la relevancia de la tecnología de SIEMENS en el ámbito de las comunicaciones industriales, la cual se encuentra fuertemente presente en el correcto funcionamiento del banco de ensayo y ostenta una importancia significativa.

- **PLC:** Se trata del controlador lógico programable, diseñado para el control del proceso industrial que se ensaya en este banco.

Se compone de un microprocesador, entradas y salidas digitales y analógicas y una memoria que almacena el programa o algoritmo que define su funcionamiento. Su función principal es recibir señales de entrada de los sensores, procesarlas según el programa definido y enviar señales de salida para controlar los dispositivos que componen el banco, como válvulas, bombas, etc.

El dispositivo empleado es la CPU 410-5H de Siemens [7]. Es un controlador de última generación. Este controlador está concebido especialmente para el sistema de control SIMATIC PCS 7.

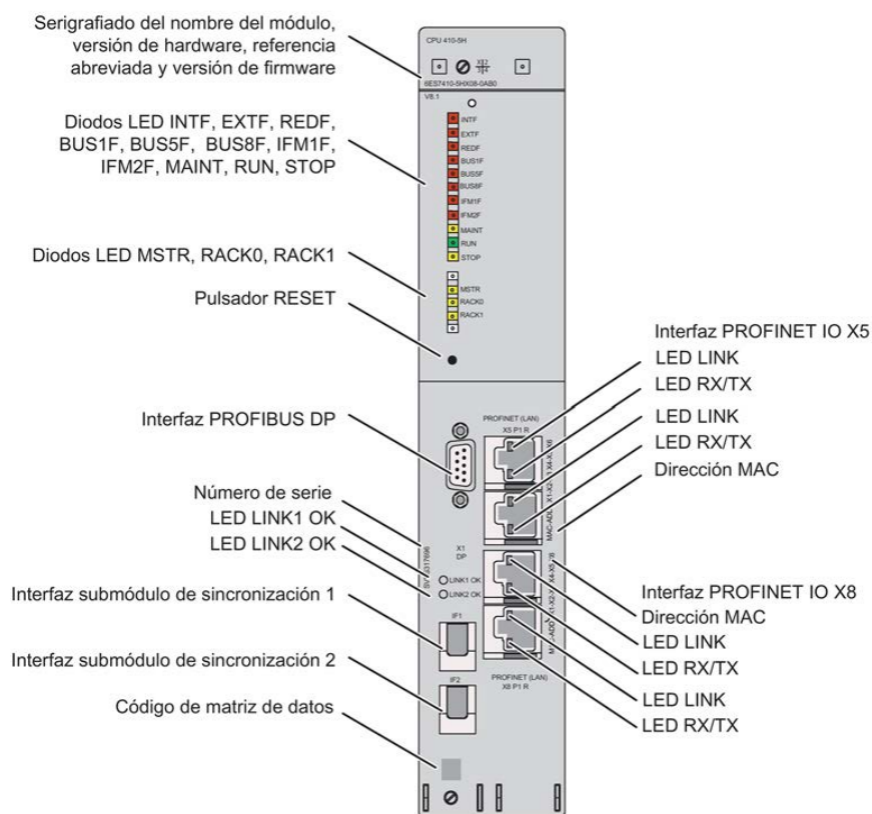


Figura 3.9: Diagrama en vista frontal de los elementos de mando del PLC. Fuente: [7]

En un proyecto PCS 7 se incluyen varios objetos de programación, entre ellos: la configuración de hardware, los bloques y los esquemas CFC y SFC (Continuous Function Chart y Sequential Function Chart respectivamente). La creación de un proyecto PCS 7 se lleva a cabo en la Estación de Ingeniería, donde se encuentran diversas aplicaciones a disposición del usuario. El SIMATIC MANAGER es la aplicación principal de PCS 7, desde la cual se abren todas las herramientas necesarias para ajustar el proyecto. La configuración de hardware de la instalación, como la CPU, la fuente de alimentación y los procesadores de comunicaciones, se realiza a través de la aplicación de configuración de hardware. Los editores CFC y SFC permiten la creación de esquemas de control continuo y secuencial, respectivamente. Además, PCS 7 cuenta con varios editores para configurar la estación del operador. Todas estas aplicaciones disponen de interfaces gráficas de fácil manejo, lo que permite una visualización clara de los datos con los que se trabaja. Cabe destacar que estos objetos están disponibles independientemente de la cantidad de estaciones de operador, módulos y su interconexión en el proyecto.

- **Periferia descentralizada:** Es la técnica de control de señales de E/S de los componentes industriales mediante redes industriales y un mínimo de cableado. Se utiliza a gran escala en la industria, permitiendo una mayor eficiencia en la gestión de procesos.

Para el correcto funcionamiento de esta tecnología, es necesario un módulo encargado de centralizar la conexión de todos los elementos controlados, así como de los actuadores, y ha de procesar la información recibida por parte del autómatas de la máquina.

<i>Componente</i>	<i>Referencia</i>
Control	
CPU 410 – 5H	6ES7-410-5HX08-0AB0
Periferia Descentralizada	
SCALANCE X208	6GK5208-0BA00-2AA3
Acoplador PROFIBUS DP/PA	6ES7157-0AC83-0XA0
AFD de 8	6ES7157-0AG82-0XA0
ET200SP	
IM 155-6 PN ST	6ES7155-GAU00-0BNO
CM PtP	6ES7137-6AA00-0BA0
DQ 16x24VDC/0,5A ST	6ES7132-6BH00-0BA0
AI 4xI 2/4 hilos ST	6ES7134-6GD00-0BA1
AI 4xI 2-wire 4...20mA HART	6ES7134-6TD00-0CA1
Tarjeta Célula de Carga	7MH4138-6AA00-0BA0

Figura 3.10: Autómata y componentes de la periferia descentralizada. *Fuente: [2]*

SCALANCE es un switch industrial empleado para la interacción del sistema con el software PCS7 de Siemens. Otro término nuevo es el ET200SP, un sistema de periferia altamente escalable y extremadamente flexible, ya que permite la conexión de las señales del proceso a un controlador de nivel superior mediante un bus de campo. Además, cabe comentar las siglas siguientes:

- **D:** Digital
- **A:** Analógico
- **Q:** Salida
- **I:** Entrada

Con lo expuesto arriba, se puede entender que *AI*, por ejemplo, corresponde a *entrada analógica*.

Las ventajas y desventajas de emplear una periferia descentralizada se resumen en la tabla a continuación.

Ventajas	Desventajas
Adaptable a entornos más pequeños	Mayor complejidad de la arquitectura de comunicaciones
Menor número de cables	Mayor número de equipos
Reducción de tiempos muertos	Más difícil de entender
Fácilmente ampliable y modificable	
Fácil identificación de entradas y salidas	
Ayuda al diagnóstico y reparación de averías	

Tabla 3.1: Ventajas y desventajas de la periferia descentralizada.

- **Variadores de frecuencia:** Permiten el control de velocidad de giro de cada bomba. Se dispone de dos variadores de frecuencia, de modelo G120 CU230P-2_PN.



Figura 3.11: Variador de frecuencia G120 CU230P-2_PN. Fuente: [8]

Este modelo de variador de frecuencia está especialmente adaptado para trabajar con interfaz PROFINET.

Ambos variadores cuentan con un panel inteligente de operador (IOP). Es una pantalla gráfica que trabaja como interfaz humano-máquina. En la siguiente imagen se puede ver un diagrama del IOP, así como una tabla indicando todos sus botones y funcionamiento.









	<ul style="list-style-type: none"> • Para seleccionar un menú se gira la rueda de navegación, p. ej. ASISTENTE • Pulsando la rueda de navegación (OK) se confirma la selección correspondiente.
	<p>Al pulsar se alterna entre fuentes de mando externas y el IOP.</p> <ul style="list-style-type: none"> • MANUAL significa: manejo manual con las teclas del IOP • AUTO significa: el convertidor reacciona a las órdenes de mando externas (p. ej. bus de campo o bornes)
	<ul style="list-style-type: none"> • En el modo de operación AUTO: sin función • En el modo de operación MANUAL: al pulsar se arranca el convertidor
	<ul style="list-style-type: none"> • En el modo de operación AUTO: sin función • En el modo de operación MANUAL: <ul style="list-style-type: none"> – Al pulsar brevemente: DES1, el motor se para con la rampa de deceleración ajustada (P1121) – Al pulsar más de 3 segundos: DES2, el motor gira por inercia hasta la parada
	<ul style="list-style-type: none"> • Al pulsar se obtiene información sobre la indicación actual • Al pulsar de nuevo se regresa a la indicación
	<ul style="list-style-type: none"> • Al pulsar brevemente: retorno a la indicación precedente • Al pulsar más de 3 segundos: el IOP vuelve a la pantalla de estado

Figura 3.12: IOP de los variadores de frecuencia (1 - Estado y diagnóstico, 2 - Aviso de tensión de salida, 3 - Aviso de frecuencia de salida, 4 - Menú de selección). *Fuente: [9]*

- **Sensores y transmisores:** Tienen la función de medir y transmitir las variables relevantes del ensayo, tales como caudales, presiones, revoluciones por minuto, voltajes, entre otros. Tanto su funcionamiento teórico como práctico son detallados a continuación³.

³Para conocer el lugar exacto donde se encuentran instalados los sensores, visitar la Figura 3.29, donde puede verse un esquema de todo lo que compone el circuito.

- **Caudalímetro Vórtex:** Mide el caudal del flujo gracias al *Efecto Von Kármán* [10]. Este efecto permite la medida del caudal gracias a la presión diferencial que se forma en la trayectoria del agua cuando el líquido se ve obstruido, generando unos vórtices en el lado tras la obstrucción.

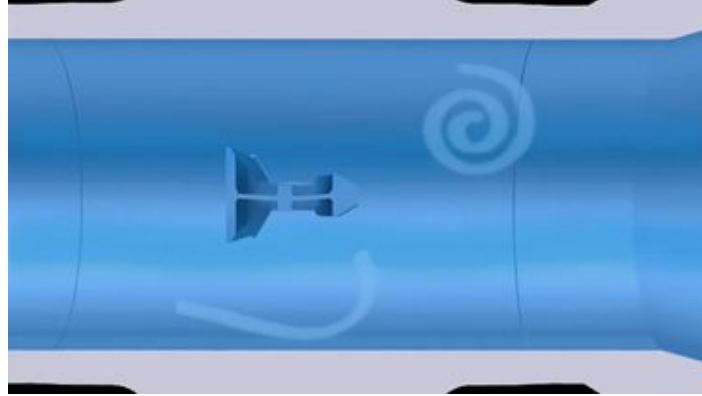


Figura 3.13: Esquema flujo agua en caudalímetro vórtex. Fuente: [11]

Los vórtices pasan por un pequeño elemento de detección situado tras la barra de vertido, que oscila hacia adelante y hacia atrás a una frecuencia específica. La geometría única de la barra generadora produce una frecuencia de vórtices que es directamente proporcional a la velocidad del líquido en movimiento. Conociendo el área transversal de la tubería, es posible calcular el caudal volumétrico del fluido. La ecuación que define el comportamiento del fluido, y que permite calcular el caudal de agua a través del caudalímetro es la siguiente:

$$Q = A * V = f * \frac{A * d}{St} \quad (3.1)$$

Siendo Q el caudal, A la sección transversal de tubería, V la velocidad del fluido, f la frecuencia específica a la que se generan los vórtices, d la longitud característica de la barra generadora (su diámetro) y St el número de Strouhal, todas las variables en S.I.



Figura 3.14: Caudalímetro Vórtex instalado en el banco de ensayo. Fuente: E.P.

- **Caudalímetro Electromagnético:** El principio de funcionamiento se basa en la *ley de Faraday*, que establece que al mover un conductor a través de un campo magnético, se induce una corriente eléctrica en dicho conductor.

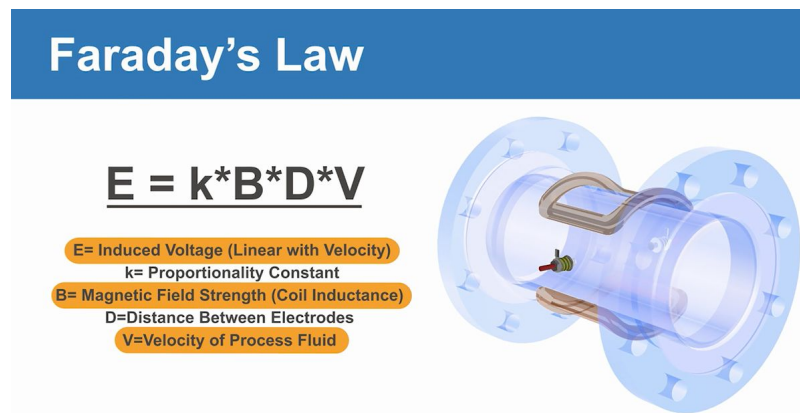


Figura 3.15: Ley de Faraday aplicada a caudalímetro electromagnético. Fuente: [12]

En el caso del caudalímetro electromagnético, el líquido actúa como el conductor en movimiento, y el campo magnético es generado por uno o varios imanes en el medidor. La velocidad del líquido se mide en función de la fuerza electromotriz generada en los sensores colocados en las paredes del medidor. De esta manera, el caudalímetro electromagnético puede proporcionar una medición precisa y fiable del caudal de los líquidos conductores que fluyan a través de él.

Estos caudalímetros han de montarse en tuberías no metálicas, para no interferir en la medida del caudal. Se trata de caudalímetros muy precisos, con una larga vida útil. Además, las pérdidas de carga a través de él son mínimas, pues no hay discontinuidades en el interior de la tubería.



Figura 3.16: Caudalímetro electromagnético instalado en el banco de ensayo. Fuente: E.P.

- **Caudalímetro Ultrasonidos:** También llamado caudalímetro Doppler por el efecto físico que define su funcionamiento [13]. Este efecto se produce cuando una señal ultrasónica se refleja en las partículas o las burbujas de un gas en movimiento dentro del

líquido fluido. Mediante el empleo del cambio de frecuencia de una onda de sonido al reflejarse en las discontinuidades en movimiento presentes en el líquido en movimiento, y con la emisión de ondas ultrasónicas en el interior de un tubo que contiene el líquido, se pueden detectar las ondas reflejadas en las discontinuidades. La frecuencia de estas ondas varía en función de la velocidad del líquido y es proporcional al caudal.

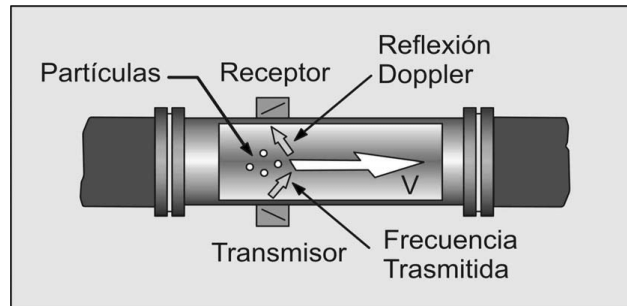


Figura 3.17: Principio de funcionamiento del caudalímetro de ultrasonidos. Fuente: [14]

La expresión que permite obtener el caudal que circula por la tubería es la siguiente:

$$Q = A * v = A * K * \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} * t_{BA}} \quad (3.2)$$

Siendo K un factor geométrico proporcionado por el fabricante, v la velocidad media del flujo y A la sección de tubería.

En este contexto, es importante entender que cuando no hay flujo en el caudalímetro, los tiempos entre los transductores (receptor y transmisor) son iguales en ambos sentidos, es decir, $t_{AB} = t_{BA}$. No obstante, cuando hay fluido circulando por el sensor, los tiempos no son iguales debido al efecto Doppler. La onda que se mueve en el sentido del flujo se acelera, mientras que la onda que se mueve en dirección contraria se retrasa. Esto significa que $t_{BA} > t_{AB}$. A partir de esta diferencia en los tiempos, se puede medir la velocidad del fluido y, en combinación con la sección transversal de la tubería, determinar el caudal de forma precisa. Es necesario comprender estos conceptos para entender el funcionamiento de los caudalímetros ultrasónicos y su aplicación en la medición de caudales en distintos procesos industriales.

- **Caudalímetro Coriolis:** Su funcionamiento está basado en los principios de la mecánica del movimiento. A través de un tubo que vibra circula un fluido acelerando hasta el punto de vibración de máxima amplitud. Sin embargo, al salir del tubo el fluido desacelera hasta el punto de mínima amplitud. La consecuencia es una respuesta de rotación del tubo de medición durante las situaciones de flujo mientras cruza cada fase de oscilación. Este principio puede verse esquematizado en la Figura 3.18. Para una mejor entendimiento de este principio, puede visitarse y consultarse la web de EMERSON [15], donde se encuentra un vídeo explicativo muy didáctico.

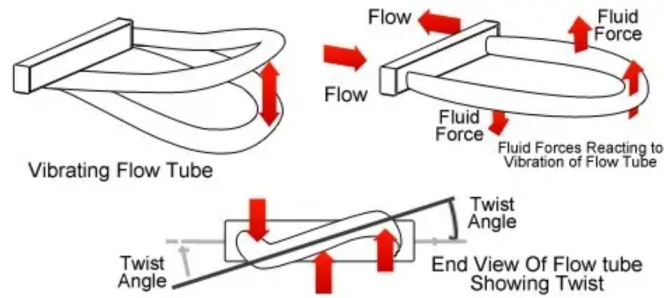


Figura 3.18: Principio de funcionamiento del caudalímetro coriolis. Fuente: [16]

La fuerza inercial conocida como efecto Coriolis [17] surge cuando una partícula o cuerpo se mueve en línea recta en un sistema en rotación, aumentando su magnitud a medida que se aleja del eje de rotación. Esta fuerza, también denominada fuerza de Coriolis, tiene la capacidad de desviar la trayectoria del objeto en cuestión y evitar que su movimiento sea completamente rectilíneo.

$$\vec{F}_c = -2m \cdot (\vec{\omega} \times \vec{v}) \quad (3.3)$$

Siendo \vec{F}_c la fuerza de coriolis, m la masa del cuerpo en cuestión (flujo de agua en este caso), \vec{v} su velocidad y $\vec{\omega}$ la velocidad angular del sistema, todo en el sistema internacional de unidades.



Figura 3.19: Caudalímetro coriolis instalado en el banco de ensayo. Fuente: E.P.

- **Tubo Venturi:** Empleado para medir caudal y definido por la ecuación de Bernouilli:

$$\frac{v^2}{2} + gh + \frac{p}{\rho} = Cte \quad (3.4)$$

Donde v es la velocidad del fluido a lo largo de la línea de corriente, g la constante de aceleración de la gravedad, h altura, p presión y ρ la densidad del fluido.

Este principio establece que la velocidad de un fluido se relaciona inversamente con su presión. Por tanto, al someter un fluido a una restricción en su flujo, se acelera su velocidad y, consecuentemente, disminuye su presión. En la zona de la restricción se genera un vacío parcial, lo que supone un aumento de la velocidad y una disminución de la presión del fluido. Al salir de la constricción, la presión del fluido se recupera y vuelve a su valor original. De este modo, se puede aprovechar el efecto Venturi para medir el caudal de un fluido a través de la medida de la diferencia de presión en los

extremos del tubo Venturi. Para ello, es necesario conocer la sección de la tubería y realizar un cálculo elemental. En la Figura 3.20 se puede ver un esquema de la teoría que define el principio del venturímetro⁴.

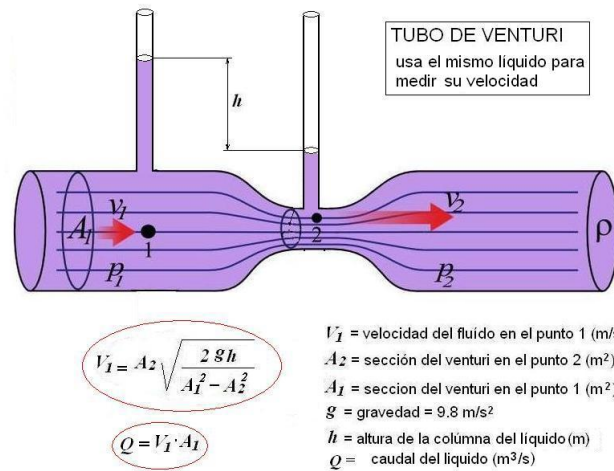


Figura 3.20: Principio de funcionamiento del tubo de venturi con un único líquido. Fuente: [18]

- Placa de orificio:** Empleada también para medida del caudal a través de una tubería, se rige por el mismo principio de funcionamiento que el tubo de Venturi. En este caso, dentro del caudalímetro se encuentran unas placas delgadas en forma de disco, en general metálicas, perforadas en su centro para permitir el paso del fluido. Se instala entre las conexiones de la tubería y se colocan tomas de presión antes y después de la placa para medir la diferencia de presión generada por los torbellinos de interferencia de flujo. A partir de esta diferencia de presión, se puede estimar la velocidad del fluido y, por lo tanto, el caudal que fluye a través de la tubería. Es un método simple pero muy utilizado en la industria para medir el flujo de fluidos en tuberías.

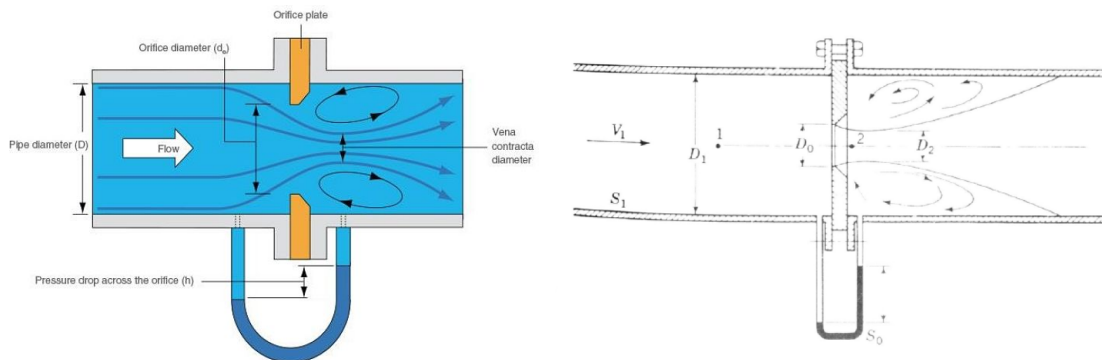


Figura 3.21: Principio de funcionamiento de la placa de orificio. Fuente: [19] y [5]

Como se ha comentado, la Ecuación 3.4 define también el comportamiento de la placa de orificio. No obstante, el fabricante proporciona una expresión genérica para la medición de cualquier fluido a través de este caudalímetro. La ecuación ha sido obtenida del trabajo de Ignacio Pérez Serrano [5].

⁴No se incluye imagen de la instalación real, ni del Tubo de Venturi ni de la Placa de Orificio, pues para ello habría que desmontar el sistema y fotografiar la parte interior de la tubería de PVC. No obstante, se encuentran instalados en los ramales indicados en 3.29.

$$G = 0,01252183 * C_d * \beta^2 * \epsilon * D_1 * \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} * \frac{\pi * D_0^2}{4} * \sqrt{\Delta P * \rho} \quad (3.5)$$

Donde:

- G : Caudal másico
- C_d : Coeficiente de descarga
- β : Relación de diámetros $\frac{D_0}{D_1}$
- ϵ : Factor de expansión
- D_1 : Diámetro interior.
- D_0 : Diámetro placa de orificio.
- ΔP : Diferencia de presiones.
- ρ : Densidad del fluido en C.N.

Para un mayor detalle en el cálculo de estos parámetros, consultar [5].

- **Transmisores de presión diferencial:** Un transmisor de presión diferencial es un dispositivo que mide la diferencia de presión entre dos puntos en un sistema, y convierte esta medición en una señal eléctrica proporcional a la diferencia de presión [20]. Es comúnmente utilizado para medir el flujo de líquidos y gases y para la detección de fugas en sistemas cerrados. Los transmisores de presión diferencial suelen estar compuestos por una celda de medición de presión, un amplificador de señal y una conexión eléctrica.

El transmisor de presión disponible en el banco de ensayo es el SITRANS P DS III [21], y está conectado a aquellos elementos que requieren de una medida de presión para su funcionamiento, como el tubo de Venturi o la placa de orificio.

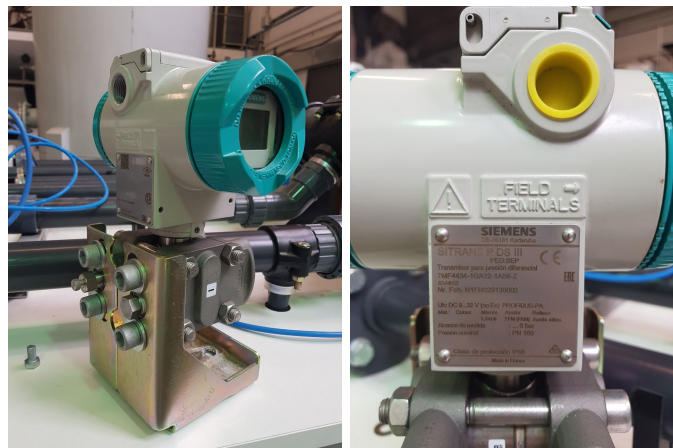


Figura 3.22: Transmisor de presión SITRANS P DS III. Fuente: E.P.

- **Transmisor de nivel:** Un transmisor de nivel es un dispositivo utilizado para medir y controlar el nivel de un líquido en un tanque o contenedor. Este dispositivo convierte la altura del líquido en una señal eléctrica que se puede utilizar para mostrar o controlar el nivel del líquido en el tanque. En el banco de ensayo, hay presente un medidor capacitivo (aunque hay en el mercado otros tipos de transmisores). El modelo que se encuentra en la maqueta es el SITRANS LC300 [22], que cuenta con una varilla metálica rígida y es capaz de medir el volumen del tanque inferior con gran precisión.

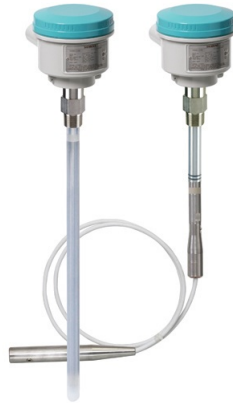


Figura 3.23: Transmisor de nivel capacitivo Siemens LC 300. *Fuente: [23]*

- **Célula de carga y tarjeta de pesaje:** La célula de carga es un dispositivo que convierte la energía potencial o fuerza de peso en una carga eléctrica que se puede medir y procesar. Se trata de un componente electrónico que procesa las señales eléctricas de las células de carga y calcula el peso de la carga. Estas tarjetas pueden tener varias funciones, como la capacidad de comunicarse con otros dispositivos o sistemas de control, o la capacidad de almacenar y transferir datos de pesaje. La célula de carga que se encuentra en el banco de ensayo es de galgas extensiométricas, modelo SITRANS WL260 SP-S AB [24].

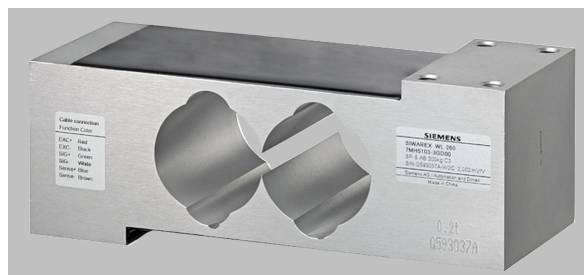


Figura 3.24: Célula de carga SITRANS WL260 SP-S AB. *Fuente: [24]*

La señal eléctrica que produce la célula de carga ha de ser leída por la tarjeta de pesaje. En este caso, la SIWAREX WP321 [25].



Figura 3.25: Tarjeta de pesaje SIWAREX WP321. Fuente: [26]

La célula de carga y la tarjeta de pesaje trabajan juntas para medir y transformar la señal eléctrica recibida en un peso, convirtiéndolo en una variable. Además, la tarjeta de pesaje ofrece una variedad de configuraciones, tales como calibraciones, ajustes de peso límite que se traducen en emergencias, número de células de carga que soportan el depósito, entre otros.

La tarjeta de pesaje se coloca en un soporte y se conecta directamente con el PLC, lo que nos permite conocer el peso medido por el sistema de pesaje. Los cables que conectan la tarjeta con la célula de carga ya están integrados en la célula y se conectan directamente con las galgas extensiométricas.

Se puede ver una imagen de la célula de carga instalada en el banco en la Figura 3.8.

3.1.4. Sistema eléctrico

El módulo de control, así como los variadores de frecuencia que controlan las bombas, deben ser alimentados con corriente eléctrica. Para asegurar que su funcionamiento es el adecuado, el sistema eléctrico se ha dimensionado para proteger los componentes ante picos de tensión e intensidad mediante interruptores diferenciales. Las fuentes de alimentación, por otro lado, requieren de corriente alterna monofásica y tensión eficaz de 230V (proporcionado por la red eléctrica instalada en el laboratorio). También se ha incluido como componente esencial del sistema una seta de emergencia. Esta seta corta la alimentación de los variadores de frecuencia en caso de descontrol de las bombas, manteniendo el control de la maqueta, ya que la parada completa de la planta sería innecesaria. Cabe destacar que el PLC tarda aproximadamente media hora en estar completamente operativo después de un corte de alimentación, por lo que pulsar la seta por accidente forzaría una parada innecesaria de la planta. Puede verse en la Figura 2.5. Sin embargo, esta seta no está funcional actualmente. Queda propuesta la conexión de este cuadro eléctrico a la seta de seguridad para trabajos futuros.

3.1.5. Sistema neumático

Para poder controlar la trayectoria del agua dentro del circuito, así como su tasa de flujo, el sistema neumático debe dar servicio a las doce válvulas todo o nada y la válvula de mariposa. En la Figura 3.26 se puede ver el diseño original del sistema neumático frente al real. Consiste en un anillo que tiene la entrada de aire en un final y la válvula de mariposa conectada a la otra toma, con seis válvulas todo o nada en cada lado para mantener la simetría y promover condiciones de presión uniformes tanto como sea posible.

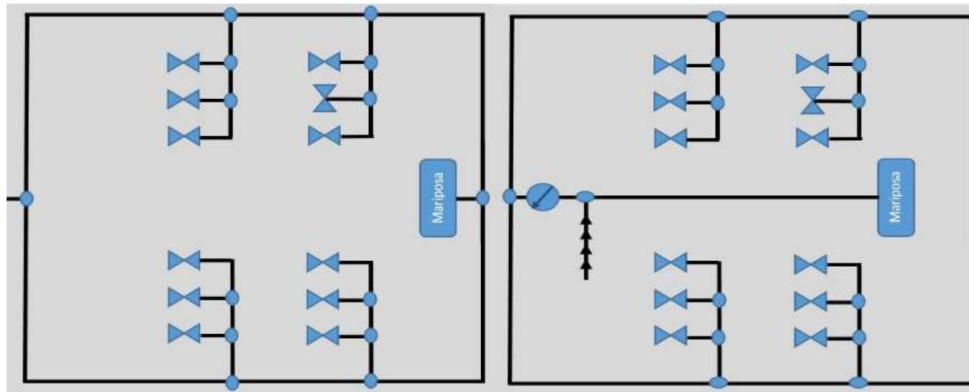


Figura 3.26: Sistema neumático original (izquierda) y real (derecha). Fuente: [2]

Toda la instalación se encuentra bajo los actuadores, para evitar problemas de condensación, y por lo tanto evitando la necesidad de incluir filtros y deshumidificadores. Por último, un regulador de presión ha de ser añadido al sistema original con el fin de proporcionar una baja presión a las válvulas todo o nada. Aunque el desempeño teórico indica que podrían trabajar a la misma presión que la válvula de mariposa, en la práctica se ha descubierto que algunas de las válvulas todo o nada han activado las protecciones de sobrepresión.

El tipo de compresor empleado es una decisión muy relevante para el correcto funcionamiento del banco. Al inicio de este proyecto, se trabajó con el compresor situado en la pared del taller (Figura 3.27a), pero este no tenía capacidad de proporcionar presión suficiente como para cerrar la válvula de mariposa y lograr caudal cero. Un tiempo después, se adquirió un compresor diferente, móvil (Figura 3.27b), el cual permitió lograr cerrados de la válvula de mariposa de hasta el 82%, cumpliendo con la necesidad de alcanzar el caudal cero para conocer la altura manométrica máxima de la bomba en unas condiciones de funcionamiento determinadas.

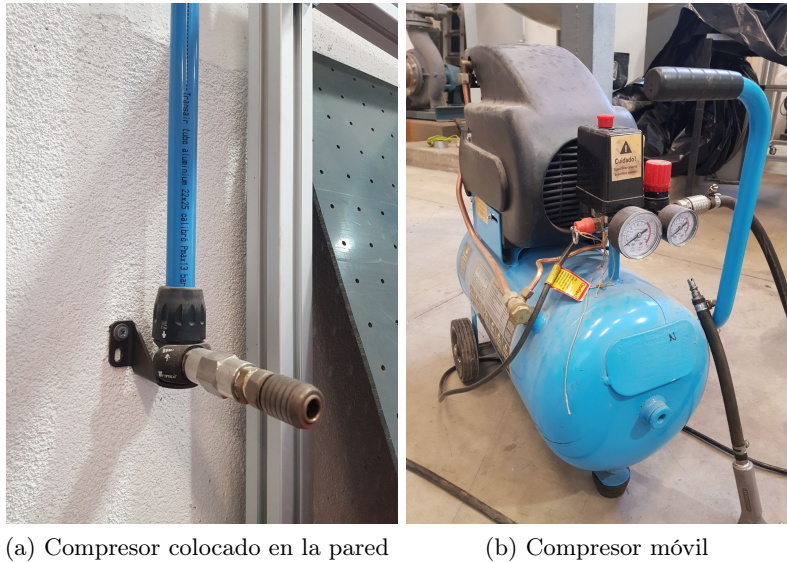


Figura 3.27: Compresores disponibles en el taller de Mecánica de Fluidos. *Fuente: E.P.*

La conexión al sistema neumático del banco de ensayo de cualquiera de los compresores (aquel que se decida utilizar) se hace en el mismo punto, situado encima del depósito inferior, en la balda intermedia del banco de ensayo. Puede verse esta conexión en la Figura 3.28

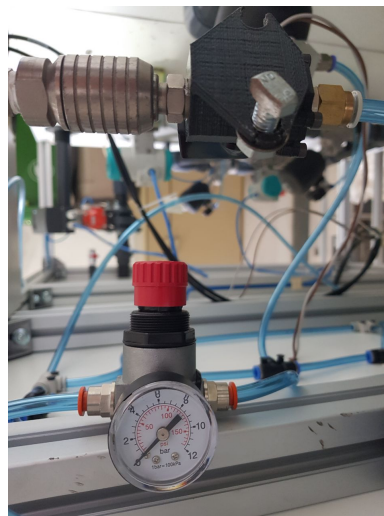


Figura 3.28: Conexión del cable neumático al cable de ensayo. *Fuente: E.P.*

3.2. Automatización del banco de ensayo

El banco de ensayo cuenta con una programación automática para la configuración de funcionamiento (Figura 3.29). Este modo automático permite seleccionar, de manera sencilla, la combinación de electroválvulas necesaria para cada configuración pre-establecida. Se distinguen tres partes principales, y se indica a continuación las válvulas que se activan al pulsar el botón indicado en cursiva:

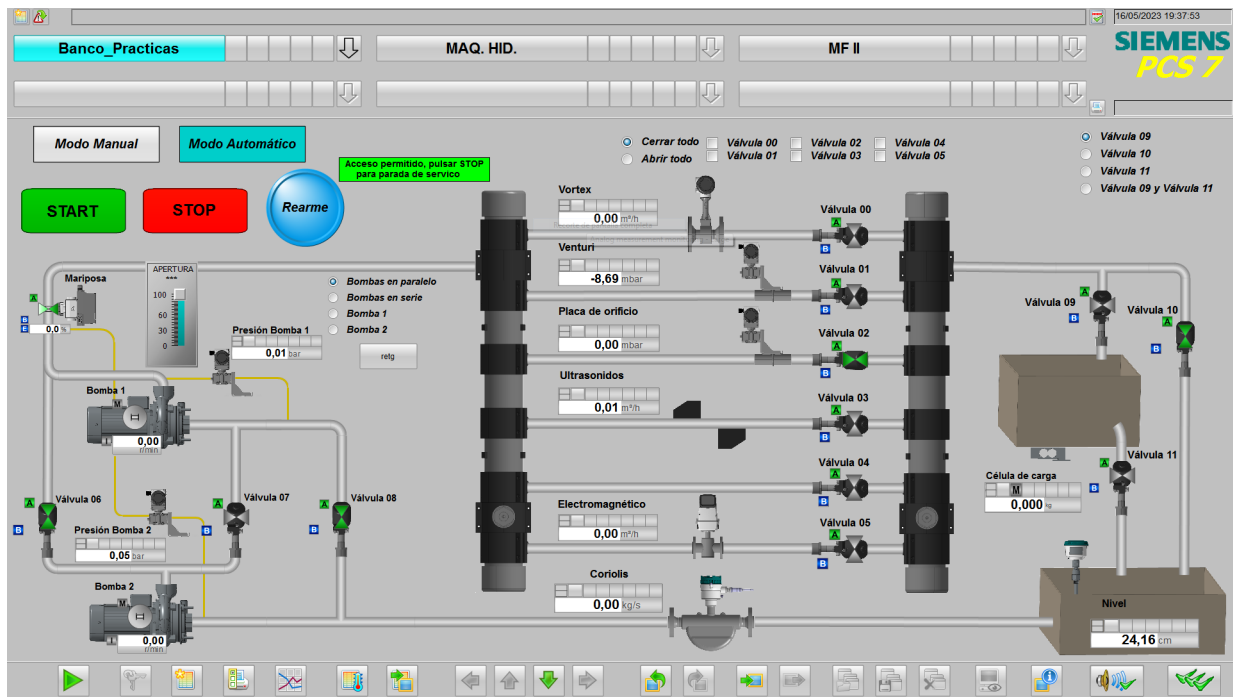


Figura 3.29: Interfaz pantalla WinCC modo automático banco de ensayo. Fuente: E.P.

■ Bombas:

- *Bombas en paralelo*: Válvula 06 y 08.
- *Bombas en serie*: Válvula 07.
- *Bomba 1*: Únicamente Válvula 08.
- *Bomba 2*: Únicamente Válvula 06.

■ Ramales:

- *Cerrar todo*: (Válvula 04 queda abierta por ser normalmente cerrada)
- *Abrir todo*: Válvula 00, 01, 02, 03, 04, 05.
- *Válvula 00*: Válvula 00.
- *Válvula 01*: Válvula 01.
- *Válvula 02*: Válvula 02.
- *Válvula 03*: Válvula 03.
- *Válvula 04*: Válvula 04.
- *Válvula 05*: Válvula 05.

■ Depósitos:

- *Válvula 09*: Válvula 09.
- *Válvula 10*: Válvula 10.
- *Válvula 11*: Válvula 11.
- *Válvula 09 y Válvula 11*: Válvula 09 y 11.

FUNCIONALIDAD	Control de las bombas	Control de caudalímetros y transmisores de presión	Control de los depósitos
VÁLVULAS ENCARGADAS	V06, V07 y V08	V00, V01, V02, V03, V04 y V05	V09, V10 y V11

El programa lleva incorporado un sistema de seguridad que impide, por ejemplo, encender bombas sin que circule agua por ellas, o cerrar todas las válvulas al mismo tiempo. Siempre se queda, mínimo, uno de los ramales abierto.

3.3. Actualización del manual de funcionamiento

En este capítulo se presenta el nuevo manual de usuario para el banco de ensayo, diseñado para ayudar a realizar con facilidad y precisión aquellos experimentos para los que está programado. Este manual se ha creado para proporcionar instrucciones precisas de como arrancarlo, desde aquellas etapas físicas que permitan la conexión del sistema, como los pasos para cargar el proyecto en el PLC. Finalmente se encuentra un resumen de todas las etapas, para usuarios más experimentados que únicamente necesiten un refresco de memoria.

Con este manual, se puede trabajar por completo con sus capacidades, dando la oportunidad de explorar las características de las prácticas de las asignaturas de mecánica de fluidos y de máquinas hidráulicas con facilidad.

3.3.1. Pasos antes de abrir el programa SIMATIC Manager PCS7

1. Conectar el cable a la corriente.



Figura 3.30: Conexión cable de corriente. *Fuente: E.P.*

2. Conectar el cable del compresor⁵.

⁵Puede emplearse otro compresor, lo esencial es que quede conectado con el banco de ensayo como se muestra



Figura 3.31: Conexión del compresor. Cable derecho. *Fuente: E.P.*



Figura 3.32: Conexión del compresor en el banco. *Fuente: E.P.*

en las Figuras 3.32 y 3.33.



Figura 3.33: Detalle conexión del compresor con el banco. *Fuente: E.P.*

3. Subir los diferenciales de la corriente del banco, y del compresor y ordenador.

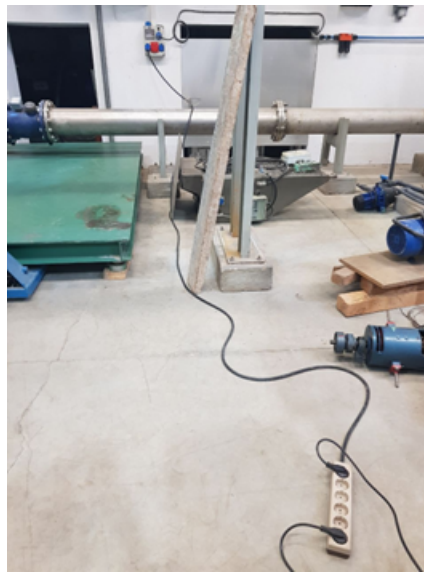


Figura 3.34: Vista de regleta que da corriente al monitor y la torre del PC. *Fuente: E.P.*



Figura 3.35: Detalle diferencial de regleta y compresor. *Fuente: E.P.*



Figura 3.36: Cuadro eléctrico del banco de ensayo. *Fuente: E.P.*

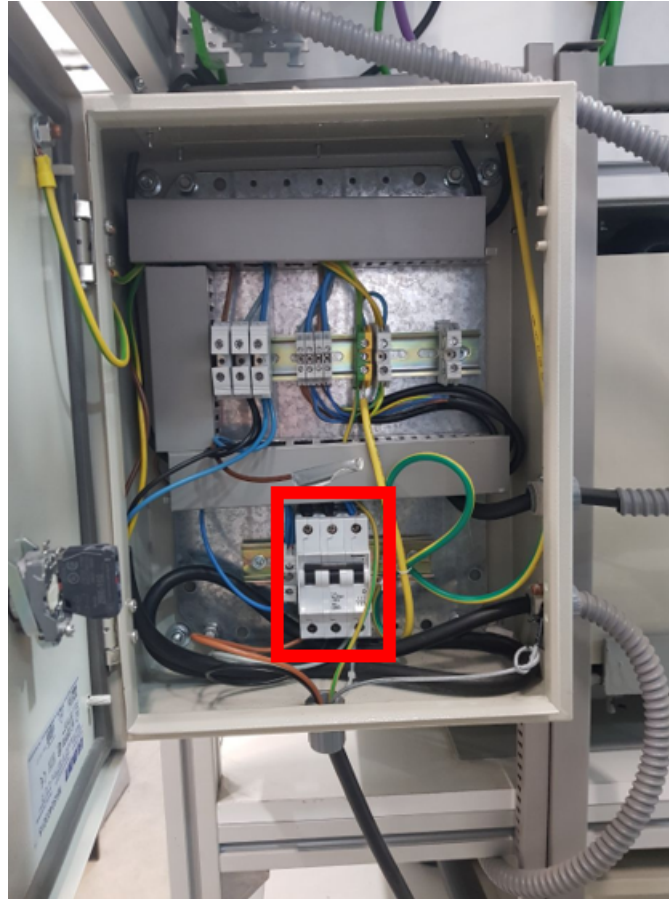


Figura 3.37: Diferencial activado del banco de ensayo. *Fuente: E.P.*

4. Encender el PLC subiendo la pestaña de encendido.



Figura 3.38: PLC. *Fuente: E.P.*



Figura 3.39: Detalle del botón de encendido, en ON. *Fuente: E.P.*

- Importante tener el ethernet bien conectado. La luz de conexión con el ordenador debe parpadear.



Figura 3.40: Conexión cable ethernet. *Fuente: E.P.*

- El PLC tardará en arrancar unos 15-20 minutos si no dispone de la pila de arranque (en cuyo caso será instantáneo), mientras parpadea la señal STOP en color naranja.
5. Tras unos 15 minutos de espera, el PLC debería dejar de parpadear y se verán las siguientes señales.



Figura 3.41: Encendido del PLC. *Fuente: E.P.*

El programa no ejecutará su programación a no ser que el PLC se encuentre en modo RUN. Esto será configurado más adelante.

3.3.2. Pasos para cargar el proyecto en el PLC

1. Hay que confirmar que el cable ethernet está bien conectado.
2. Arrancar el programa SIMATIC MANAGER PCS7

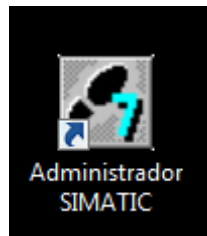


Figura 3.42: Icono SIMATIC PCS7. *Fuente: E.P.*

3. Una vez dentro de SIMATIC: *File* → *Open* → *Multiprojects* → *ProyectoSiemens_Prueba*.

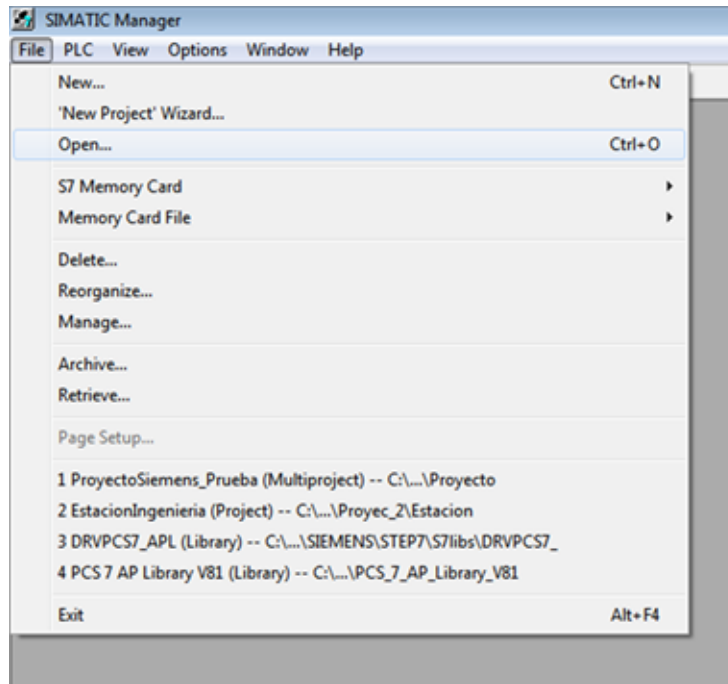


Figura 3.43: Abrir proyecto. Fuente: E.P.

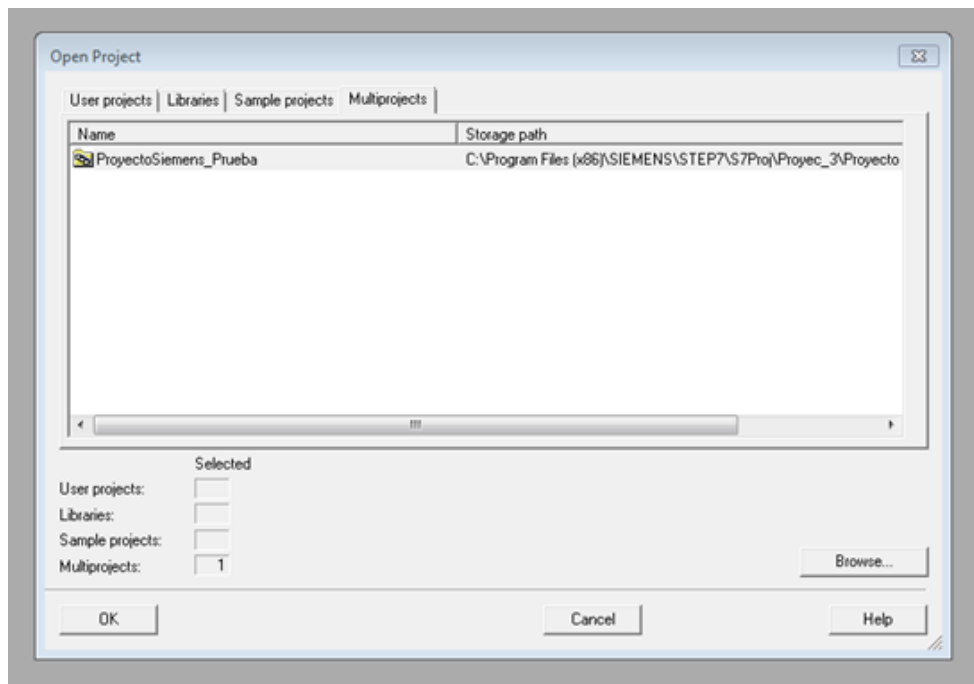


Figura 3.44: Multiprojects. Fuente: E.P.

- Tras darle a OK, se abrirá la *Component view*. Una visión ampliada de la misma puede verse en la Figura 3.46.

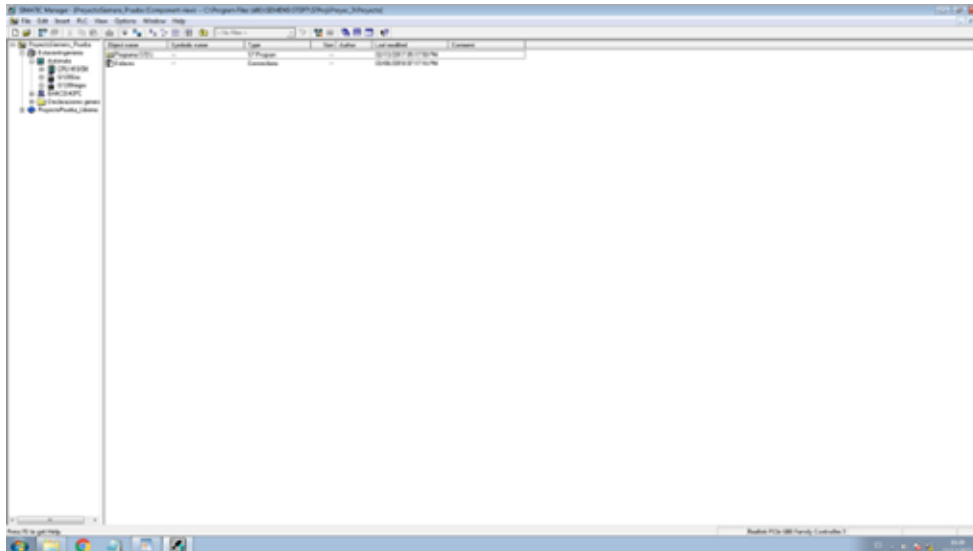


Figura 3.45: Component view. Fuente: E.P.

5. El siguiente paso es abrir el hardware de la instalación. Para ello, en la *Component view*: *ProyectoSiemens_Prueba* → *EstaciónIngeniería* → *Automata*. Dentro de *automata*, doble clic en la parte derecha. *Hardware*.

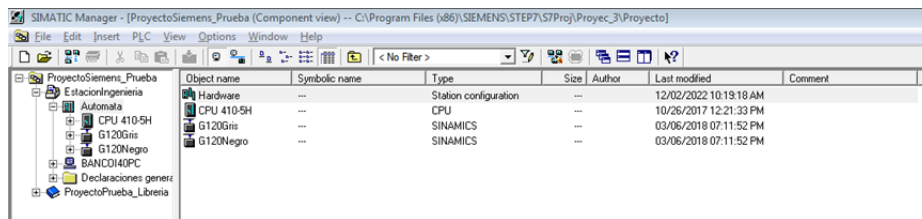


Figura 3.46: Dirección a Hardware. Fuente: E.P.

Se abrirá la siguiente ventana.

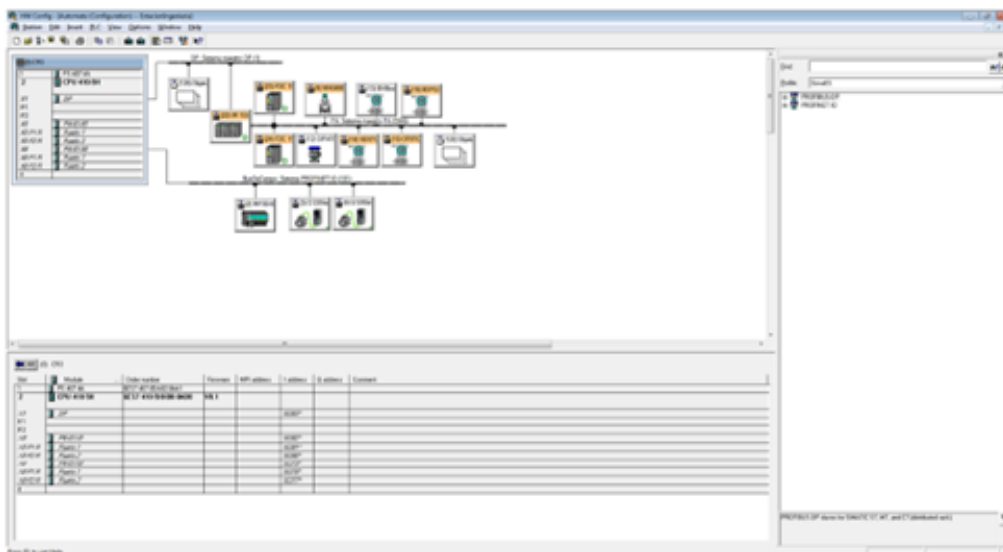


Figura 3.47: Ventana de Hardware. Fuente: E.P.

6. A continuación, pulsar el botón Save and Compile, para transferir los datos a la instalación.

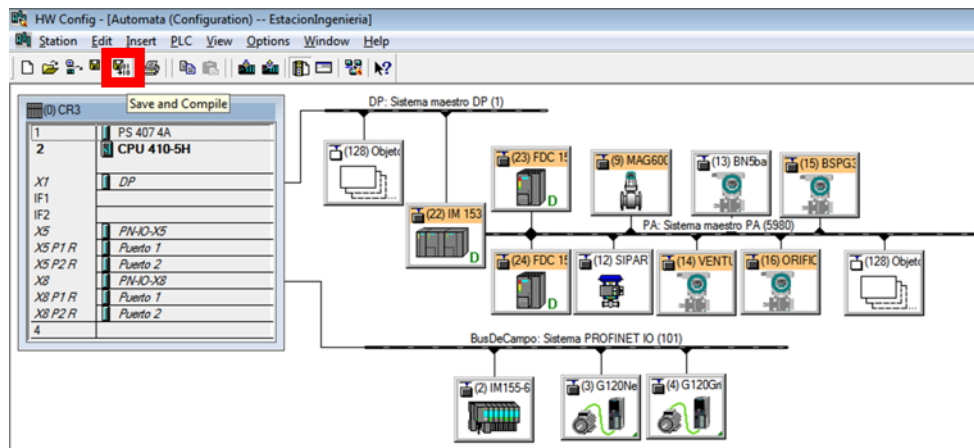


Figura 3.48: Botón guardar y compilar (Zoom a la Figura 3.47). Fuente: E.P.

7. El siguiente paso una vez guardado y compilado el programa en el PLC es descargarlo al módulo de la CPU. Pulsar el botón *Download*. Hay que marcar la opción “*Download in STOP mode*”, el módulo objetivo es “*CPU 410-5H*” y la dirección IP «192.168.1.10». Se debe arrancar el módulo aceptando *Complete restart*. Todos estos pasos están detallados en las imágenes siguientes.

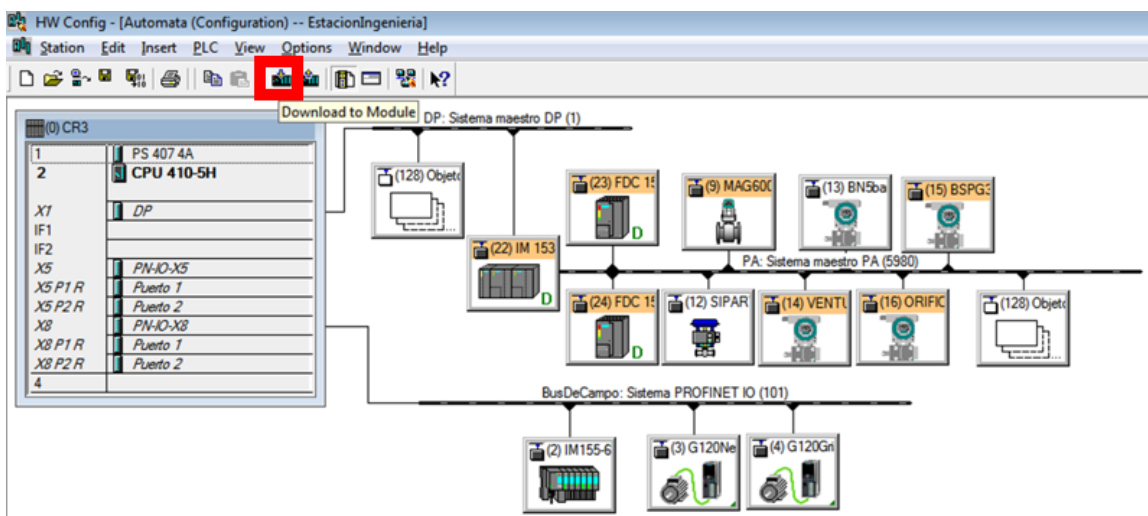


Figura 3.49: Botón download to module. Fuente: E.P.

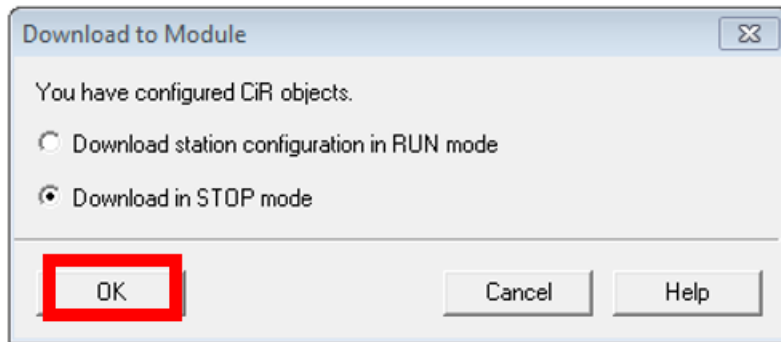


Figura 3.50: Download in STOP mode. *Fuente: E.P.*

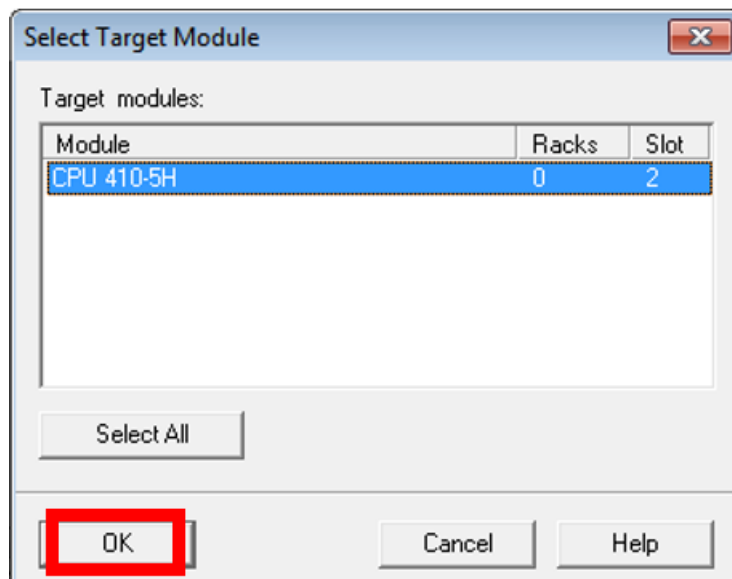


Figura 3.51: Selección de módulo objetivo. *Fuente: E.P.*

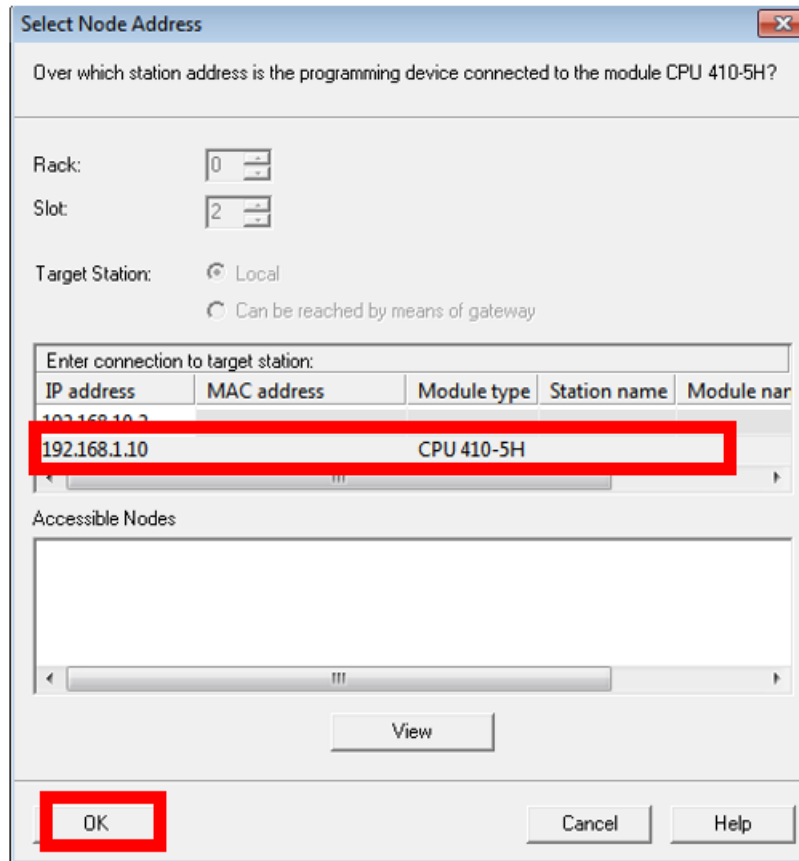


Figura 3.52: Dirección IP. Fuente: E.P.

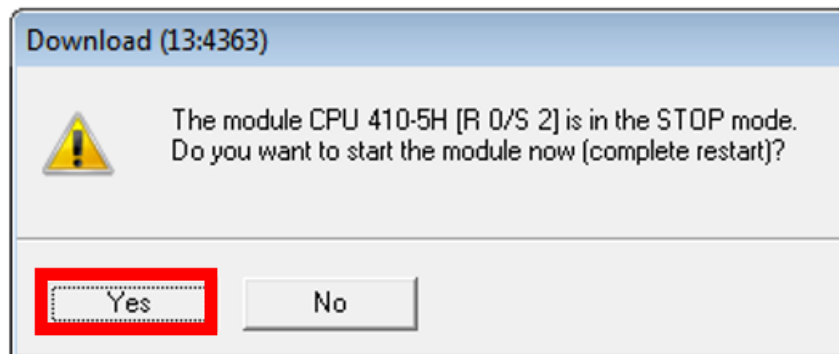


Figura 3.53: Arrancar el módulo. Fuente: E.P.

- Tras esto, volvemos a la *ComponentView* y: *ProyectoSiemens_Prueba* → *EstaciónIngeniería* → *Automata* → *CPU 410-H* → *Programa S7(1)* → *Esquemas*. Con la carpeta de *Esquemas* clicada, se pulsa el botón *Download* como indica la imagen.

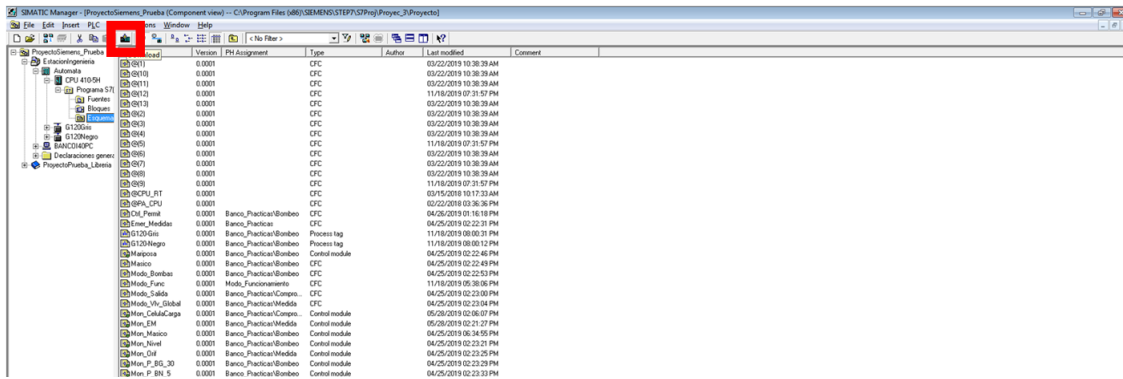


Figura 3.54: Descarga de los esquemas. Fuente: E.P.

9. Tras clicar en el botón *Download* de la pestaña de esquemas, aparece la siguiente ventana:

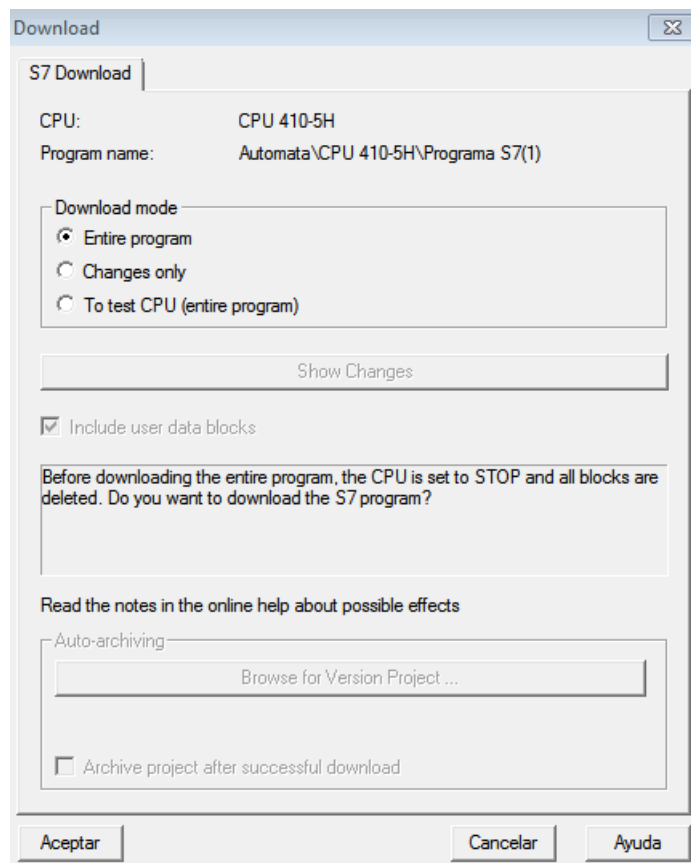


Figura 3.55: Ventana download. Fuente: E.P.

Se ha de seleccionar el modo de descarga *“Entire program”*, y pulsar *Aceptar*. Saldrá un aviso emergente como el de la imagen siguiente. Se ha de pulsar *Yes*.

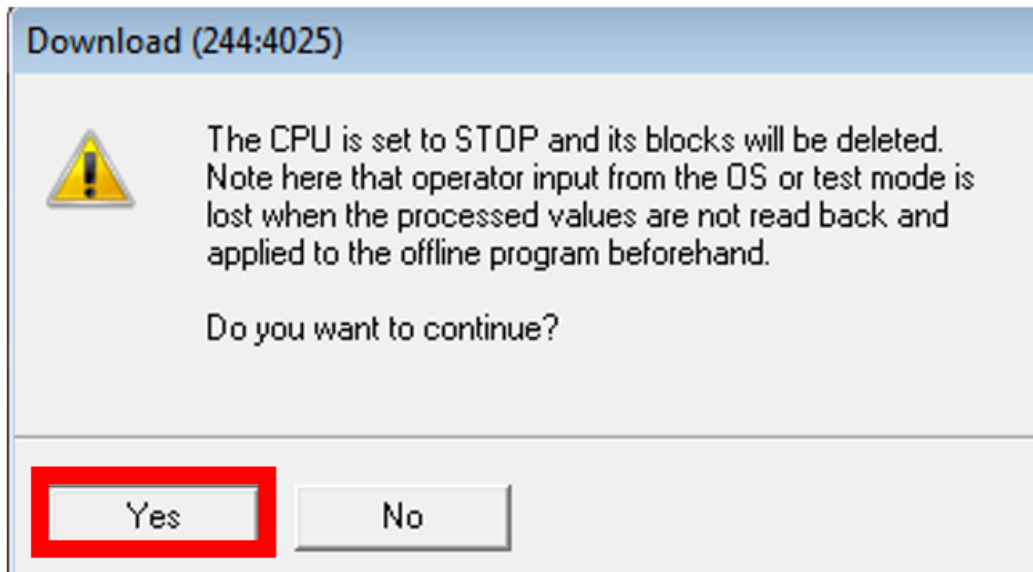


Figura 3.56: Aviso de descarga. *Fuente: E.P.*

El proceso de identificación y escritura de bloques y descarga es relativamente lento. Se debe esperar a que este finalice. Al terminar, aparece la siguiente ventana, y se selecciona *Sí*. Cerrar a continuación la ventana de warnings.

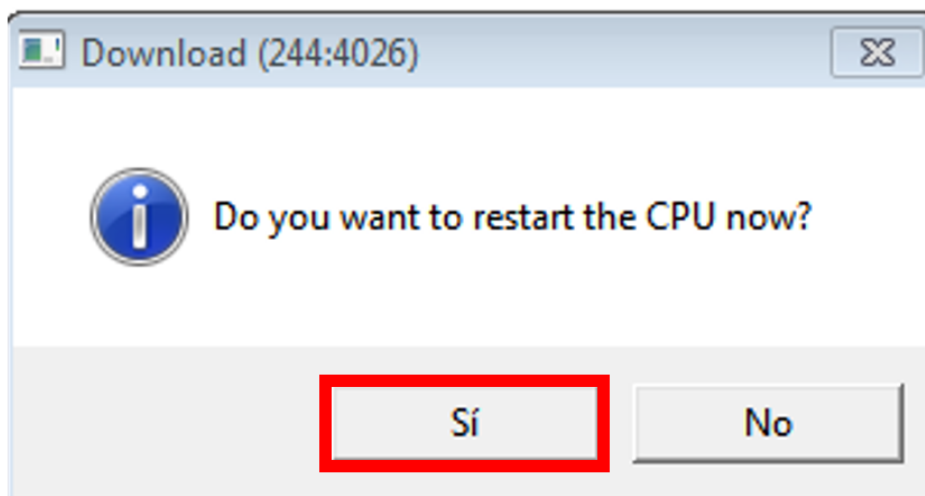


Figura 3.57: Reinicio de la CPU. *Fuente: E.P.*

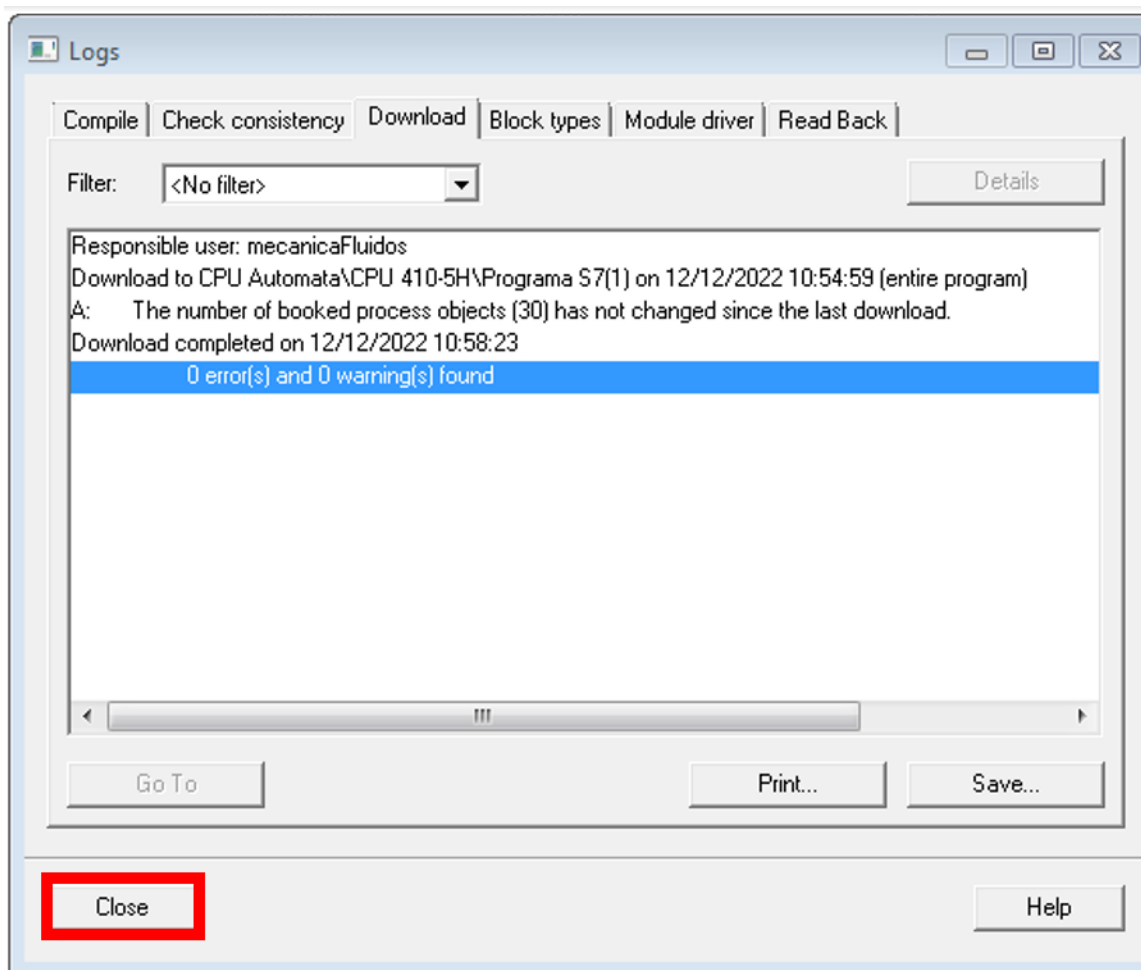


Figura 3.58: Ventana de logs. Fuente: E.P.

- *NOTA: Es posible que aparezca una ventana como la siguiente:*

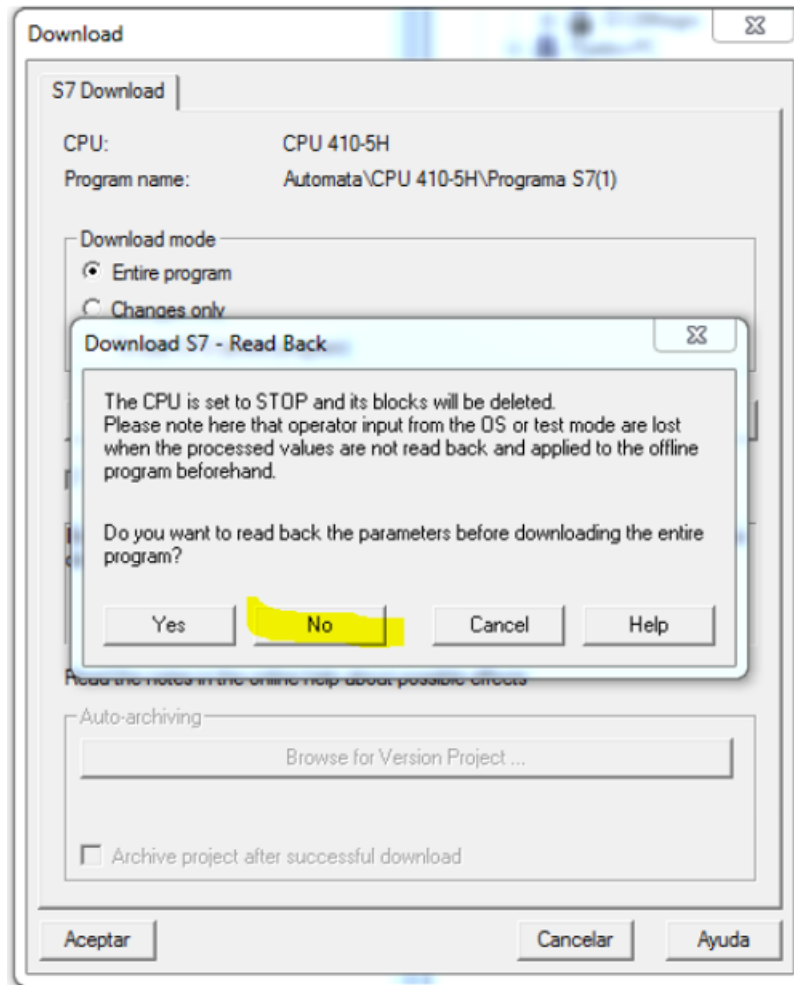


Figura 3.59: Posible ventana emergente de Download. Fuente: [5]

En ese caso, pulsar “No” como se indica.

10. Conectar los variadores de frecuencia. Para ello, doble clic en *ComponentView: ProyectoSiemens_Prueba* → *EstaciónIngeniería* → *Automata* → *G120Gris* → *G12_CU230P_2_PN* → *Puesta en marcha*. Esto abrirá el programa STARTER.

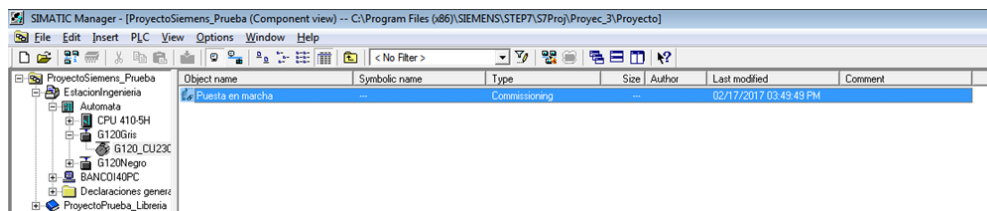


Figura 3.60: Dirección de puesta en marcha en Component View. Fuente: E.P.

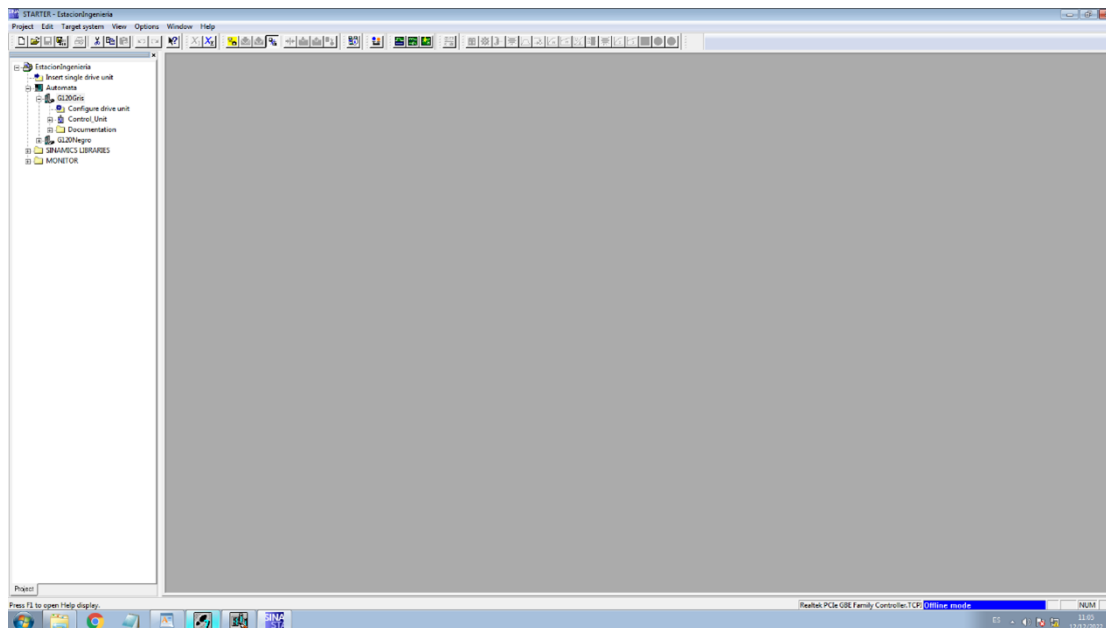


Figura 3.61: Interfaz inicial STATER. Fuente: E.P.

11. En el programa STATER: *EstaciónIngeniería* → *Automata* → *G120Gris*. Pulsar botón derecho y “Connect target device”. Tras esto, cerrar la ventana emergente.

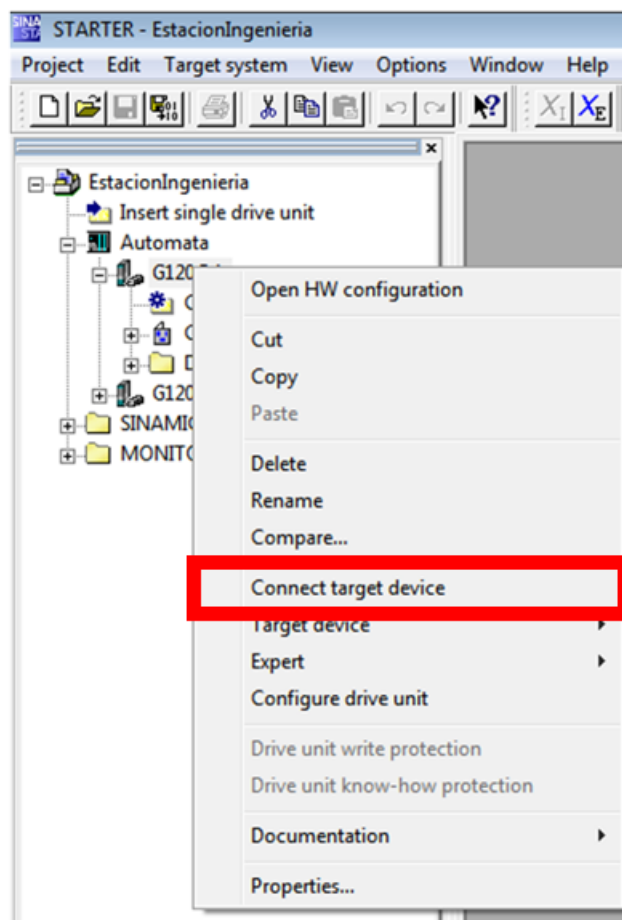


Figura 3.62: Conexión de los variadores de frecuencia. Fuente: E.P.

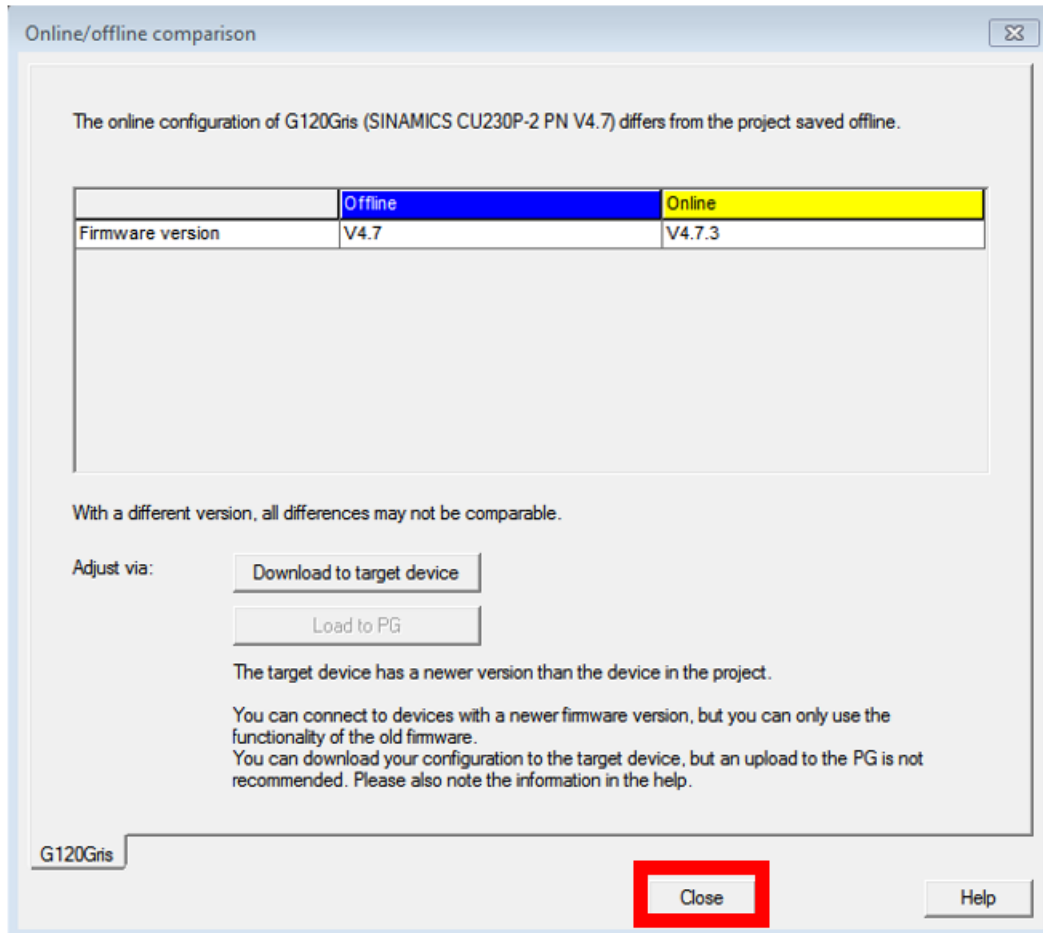


Figura 3.63: Ventana final de conexión de variador. *Fuente: E.P.*

- Una vez conectado, aparecerá una cruz de color verde a la izquierda del variador en el programa. Se han de realizar los pasos del punto 11 para los dos variadores (G120Gris y G120Negro).

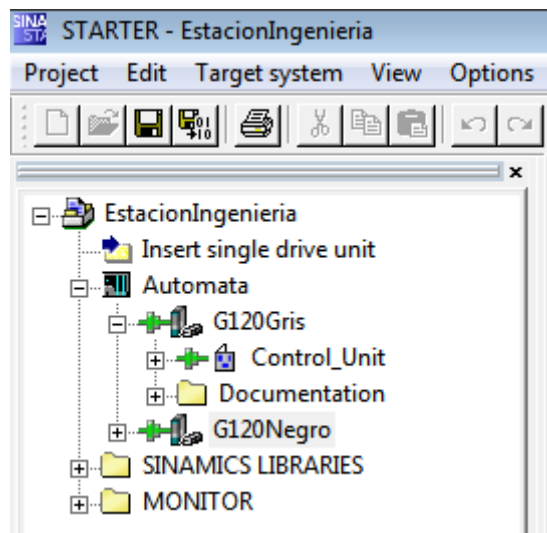


Figura 3.64: STARTER. *G120Gris* y *G120Negro* conectados. Icono verde. *Fuente: E.P.*

13. Pulsar “Acknowledge all” en la pestaña de alarmas de la parte inferior.

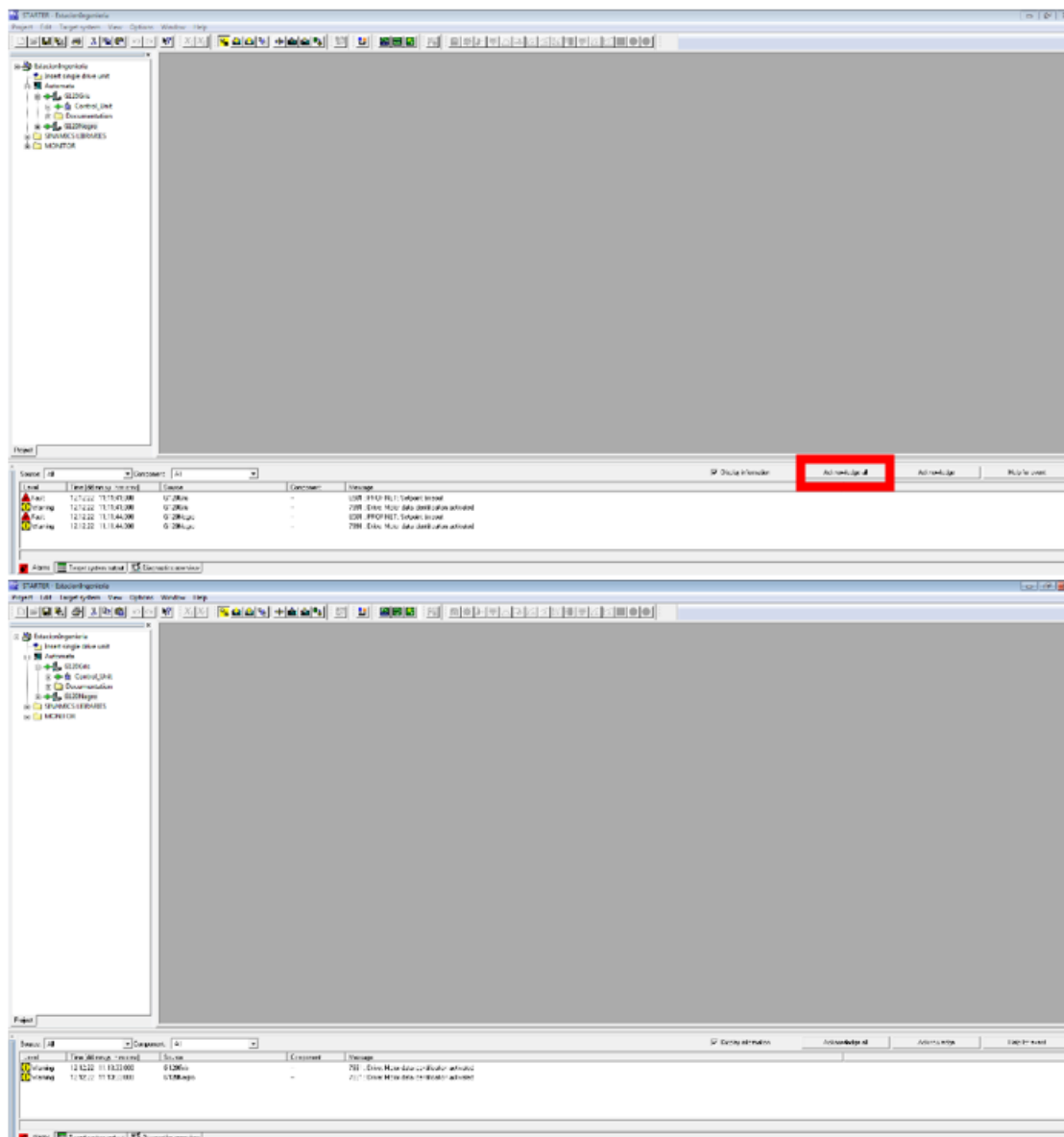


Figura 3.65: Proceso de aceptación de los errores. Fuente: E.P.

14. Conectar de manera manual los variadores de frecuencia. Se explican los pasos para uno de los variadores. El proceso ha de hacerse igual en ambos. Se puede realizar simultáneamente.



Figura 3.66: Variador de frecuencia. Fuente: E.P.

- a) Pulsar el botón “HAND AUTO” una vez para que la pantalla deje de parpadear, y otra para que el variador cambie al modo manual.
 - b) Esperar a que el símbolo de online situado en la parte superior derecha del display del variador cambie al símbolo de la mano que indica estado manual (■).
 - c) Pulsar el botón verde. El variador hará ruido.
 - d) Cuando el ruido finalice, pulsar de nuevo “HAND AUTO”, y comprobar que el símbolo está otra vez en estado online (■).
15. Poner el PLC en modo RUN. En *ComponentView: ProyectoSiemens_Prueba* → *Estación-Ingeniería* → *Automata* → *CPU 410-5H*. Clic derecho. En la pestaña PLC, clicar “*Operating mode*” (atajo Ctrl + I).

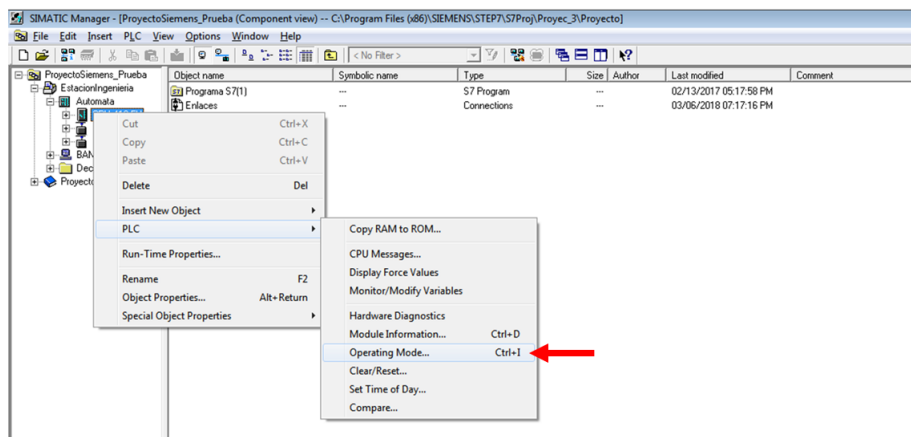


Figura 3.67: Establecimiento del modo de operación. Fuente: E.P.

Tras clicar operating mode, aparecerá la pestaña que se muestra en la imagen siguiente. Se ha de pulsar *Warm Restart*, y YES a continuación. La luz del PLC cambiará de STOP a RUN.

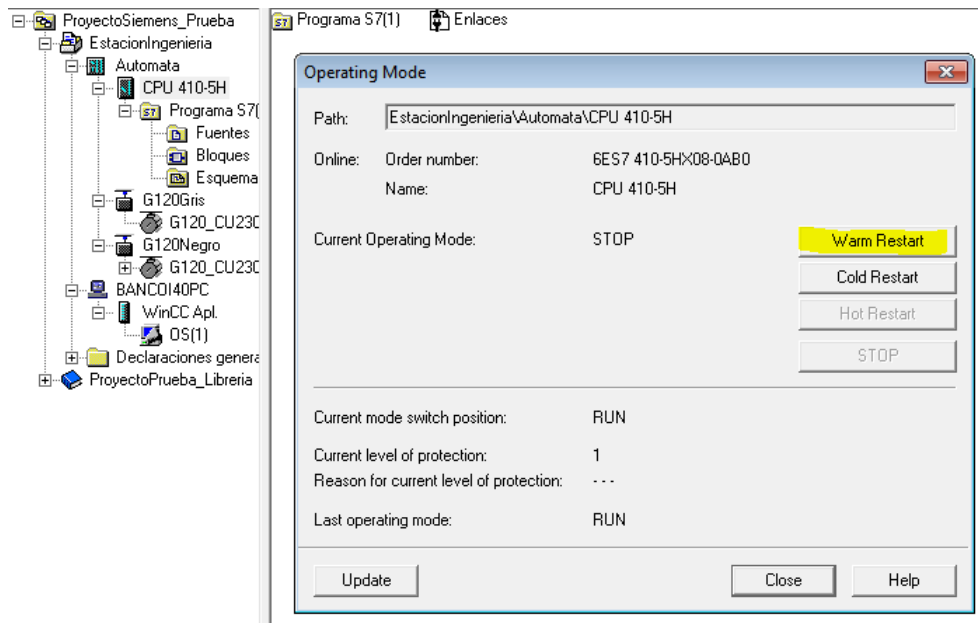


Figura 3.68: Arranque en caliente. *Warm Restart*. Fuente: E.P.

- *NOTA: En el caso de estar ya en modo RUN, no es necesario este paso. Aparecería la siguiente ventana.*

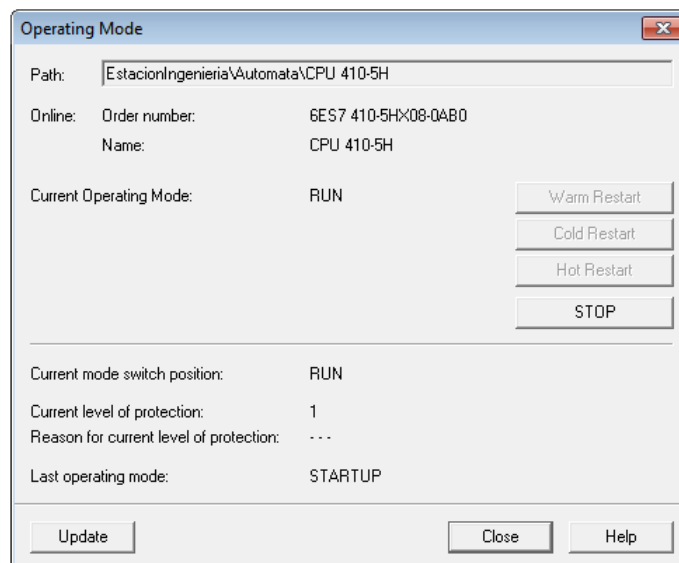


Figura 3.69: Ventana que aparece al seguir este punto, con el PLC en RUN. Fuente: E.P.

16. Arrancar WINCC. En *ComponentView*: *ProyectoSiemens_Prueba* → *EstaciónIngeniería* → *BANCOI40PC* → *WinCC Apl.* → *OS(1)*. Clic derecho y open object.

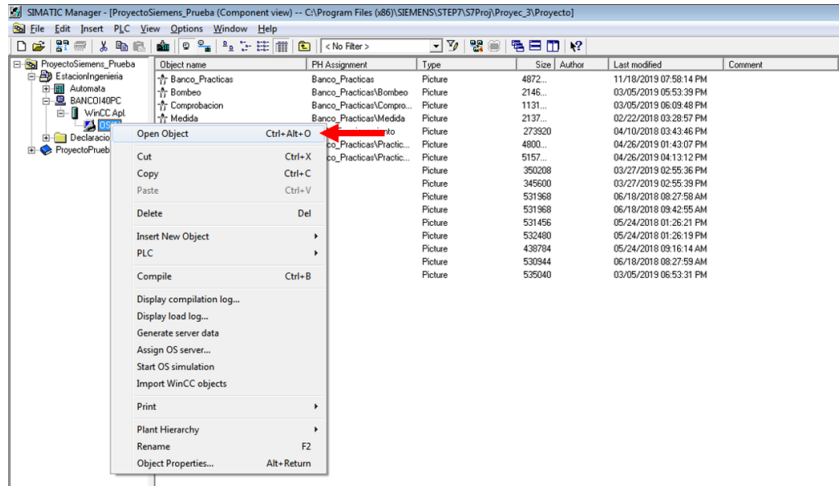


Figura 3.70: Pasos para abrir WinCC. Fuente: E.P.

- Una vez en la interfaz de WINCC, pulsar el botón “Activate”. Esto cargará completamente el programa.

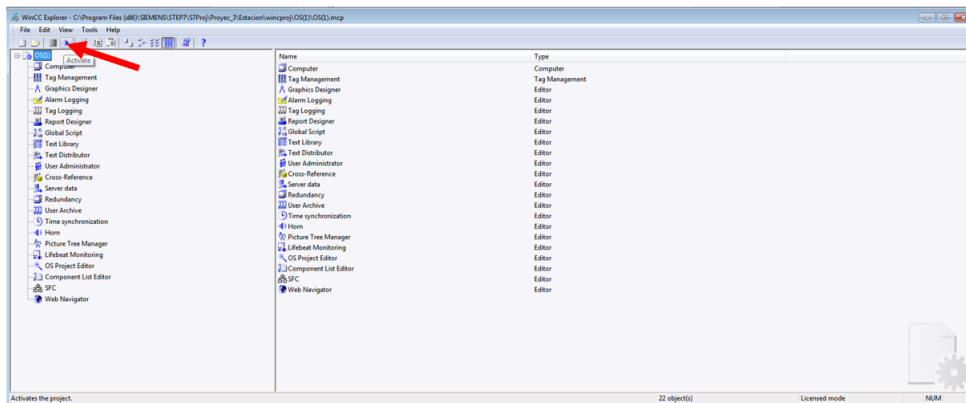


Figura 3.71: Activar WinCC. Fuente: E.P.

- En el archivo de avisos de WINCC, pulsar el botón de acuse de grupo.

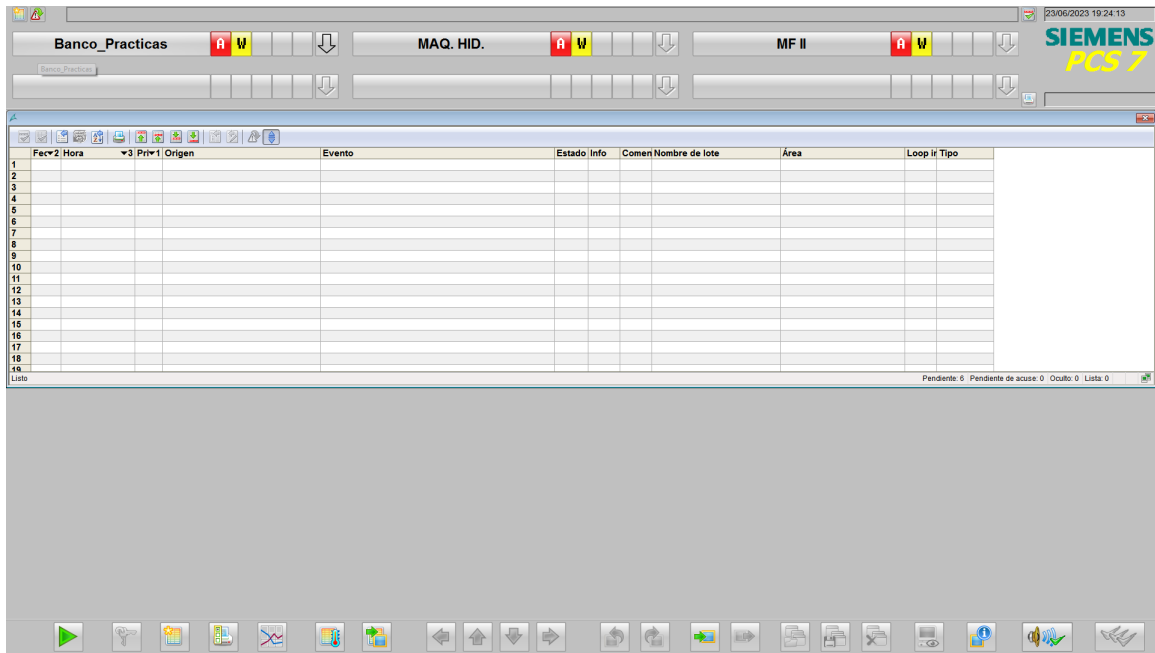
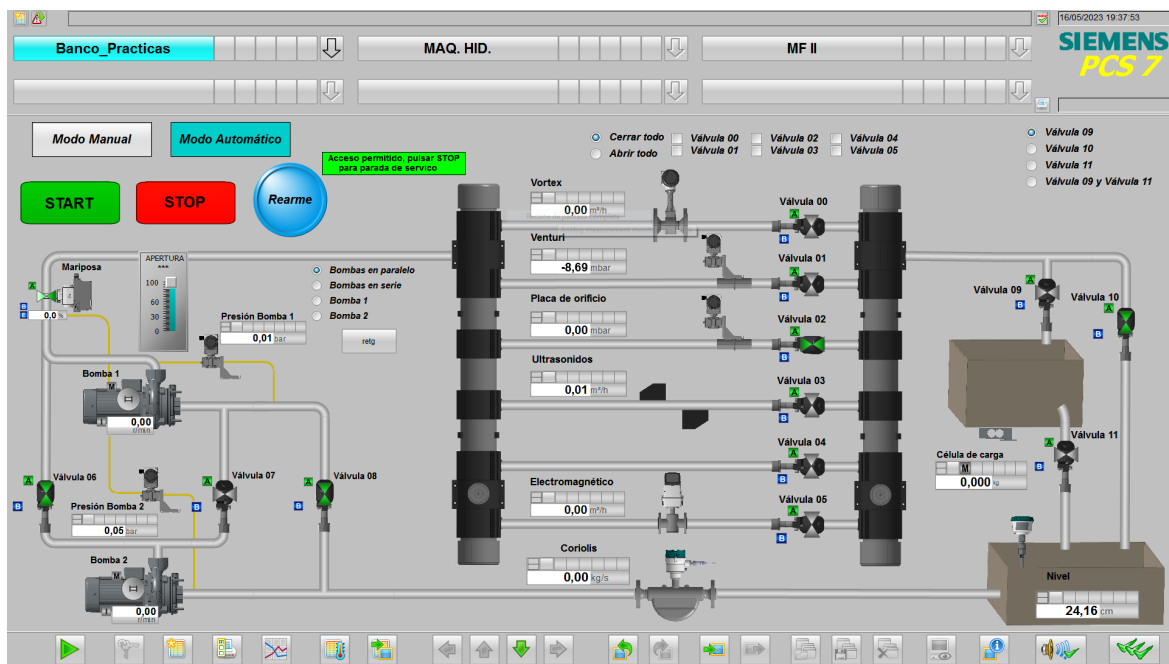


Figura 3.72: Pasos para aceptar los avisos que suceden al ejecutar WinCC. Fuente: E.P.

19. Imágenes de las pestañas de WinCC con todo cargado:



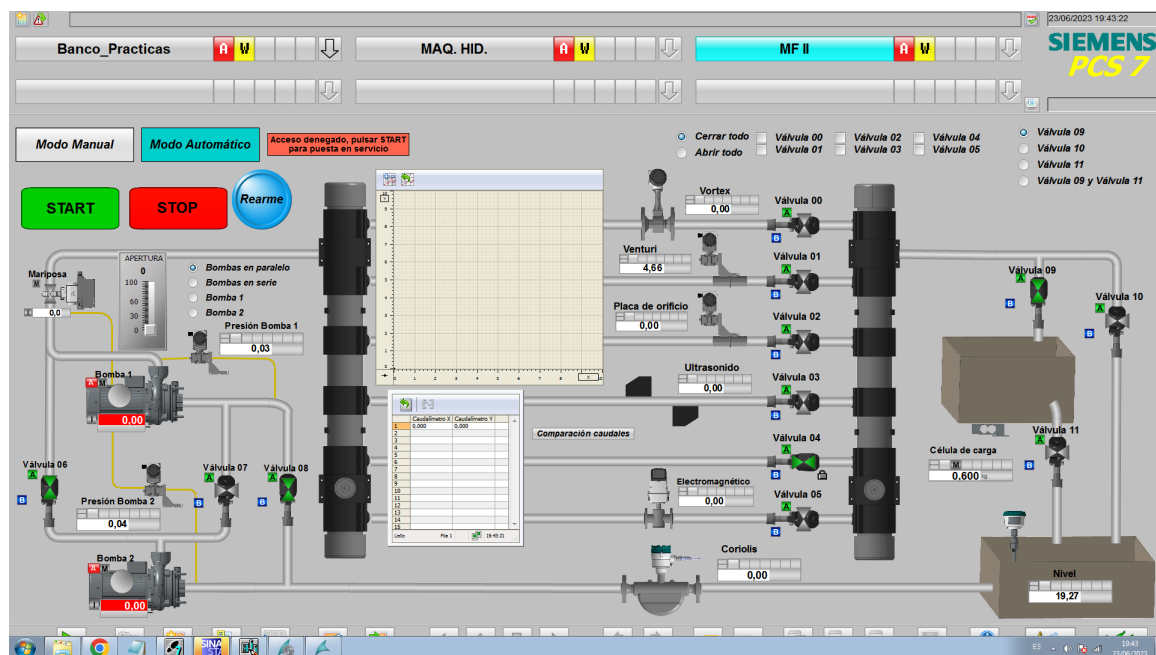
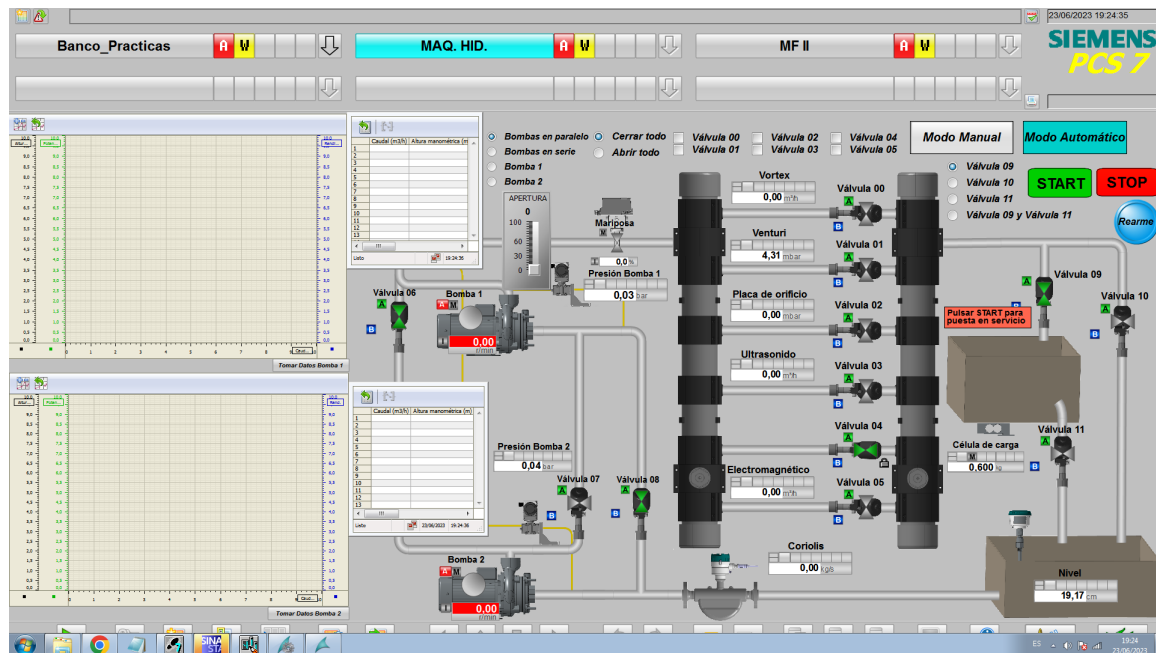



Figura 3.73: Pasos para aceptar los avisos que suceden al ejecutar WinCC. Fuente: E.P.

3.3.3. Desconexión y apagado

1. Para salir de WINCC, pulsar la tecla Windows del teclado, Alt+TAB, o un comando similar.
2. Aparecerá la barra de herramientas inferior de Windows en la pantalla.
3. Pulsar en el icono de WINCC con un engranaje  (WinCC Explorer).
4. Al igual que para encender se pulsa el botón «activate», para apagar se ha de pulsar el botón «deactivate» situado justo al lado.

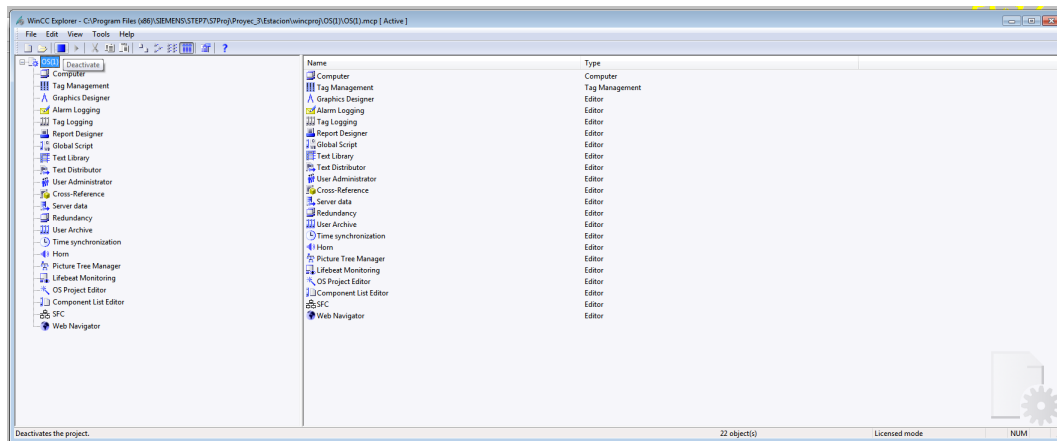


Figura 3.74: Botón «deactivate» en WinCC Explorer. Fuente: E.P.

5. Cerrar el resto de ventanas normalmente, y no guardar cambios.
6. Una vez cerrado todo, bajar los interruptores y desconectar la alimentación eléctrica y el cable del compresor.

3.3.4. Resumen etapas

- Conectar el sistema físico. Cable de corriente y compresor, así como encendido del ordenador.
- Abrir SIMATIC.
- Abrir el multiproyecto.
- “Save and compile” y “Download to module” en la pestaña de hardware.
- Descargar los esquemas del programa.
- Puesta en marcha y conexión de los variadores en STARTER.
- Conexión física de los variadores de frecuencia.
- Si no lo está, establecer el PLC en modo RUN.
- Abrir y activar el proyecto en WINCC.
- Al terminar, apagar el sistema por completo.

3.4. Implementación de lazos de control

En el ámbito de los sistemas de control, el diseño de procesos secuenciales y el control de variables físicas son elementos esenciales para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro. En este trabajo, se presenta a modo de ejemplo una sección centrada en el desarrollo de un sistema de arranque secuencial y un controlador PID para regular el nivel de un depósito de calibración.

El objetivo principal de este apartado es diseñar y analizar un Sistema de Control Secuencial (SFC) que defina un proceso de arranque secuencial de un sistema, seguido de un Controlador

de Retroalimentación Proporcional Integral Derivativo (PID) encargado de regular el nivel de un depósito de calibración ejecutado de forma continua. La interacción entre el SFC y el PID permitirá lograr un control preciso y estable del nivel del depósito, en función del porcentaje de apertura de una válvula mariposa, con independencia del régimen de giro de las bombas.

El SFC desarrollado establecerá una secuencia de pasos específicos para el arranque del sistema, asegurando que se cumplan las condiciones y secuencias necesarias para su correcto funcionamiento. Por otro lado, el controlador PID empleará una combinación de términos proporcionales, integrales y derivativos para calcular la señal de control que actúe el nivel del depósito en base a la realimentación proporcionada por la célula de carga para controlar el porcentaje de apertura de la válvula mariposa.

Ambos métodos de control se han creado en Simatic Manager. En las subsecciones siguientes se navegará el proceso de creación de los mismos, y cómo funcionan.

3.4.1. SFC de arranque

Un SFC (Sequential Function Chart o Diagrama de Funciones Secuenciales) es un lenguaje de programación gráfico utilizado en el ámbito de la automatización y el control de procesos. Es una herramienta estándar en la programación de autómatas programables, especialmente en entornos industriales. Se utiliza para describir y controlar secuencias de eventos y acciones en un sistema. Proporciona una representación visual de las etapas o fases estables de un proceso, así como acciones asociadas a cada etapa. Un SFC se compone de elementos gráficos como estados, transiciones (y condiciones asociadas a estas transiciones) y acciones, que se organizan en una estructura jerárquica. El estado representa una condición específica del sistema en un momento dado. Las transiciones son conexiones entre estados y definen las condiciones que deben cumplirse para pasar de una etapa a otra. Las acciones son las tareas o funciones que se ejecutan en cada etapa, de forma continua, así como en su activación y desactivación.

El SFC permite diseñar y especificar la secuencia de operaciones de un sistema de forma clara y comprensible. Es especialmente útil para describir procesos secuenciales complejos, como el arranque y apagado de equipos, secuencias de producción, control de maquinaria y sistemas de control distribuido.

Al utilizar un SFC, es posible visualizar fácilmente el flujo de control, identificar estados críticos, establecer condiciones de transición y definir acciones asociadas a cada etapa. Esto facilita el desarrollo, la depuración y el mantenimiento de sistemas de control, así como el análisis de su comportamiento.

En el caso que compete a este Trabajo Fin de Máster se ha creado un SFC encargado de controlar la secuencia de arranque del banco de ensayo. A continuación, se va a explicar el funcionamiento del mismo, y cómo se ha incorporado al entorno de trabajo del PLC.

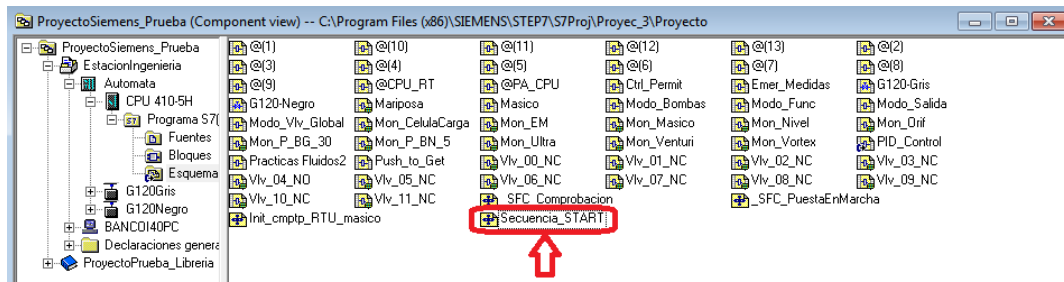


Figura 3.75: SFC dentro de la carpeta de Esquemas en la *component view*. Fuente: E.P.

En la Figura 3.76 se muestra el esquema completo del SFC. Cada uno de los pasos tiene un comentario especificando cada una de las acciones. Las condiciones o receptividades, por otro lado, siempre son relacionadas con la variable de *feedback* que establece si una válvula está abierta o no.

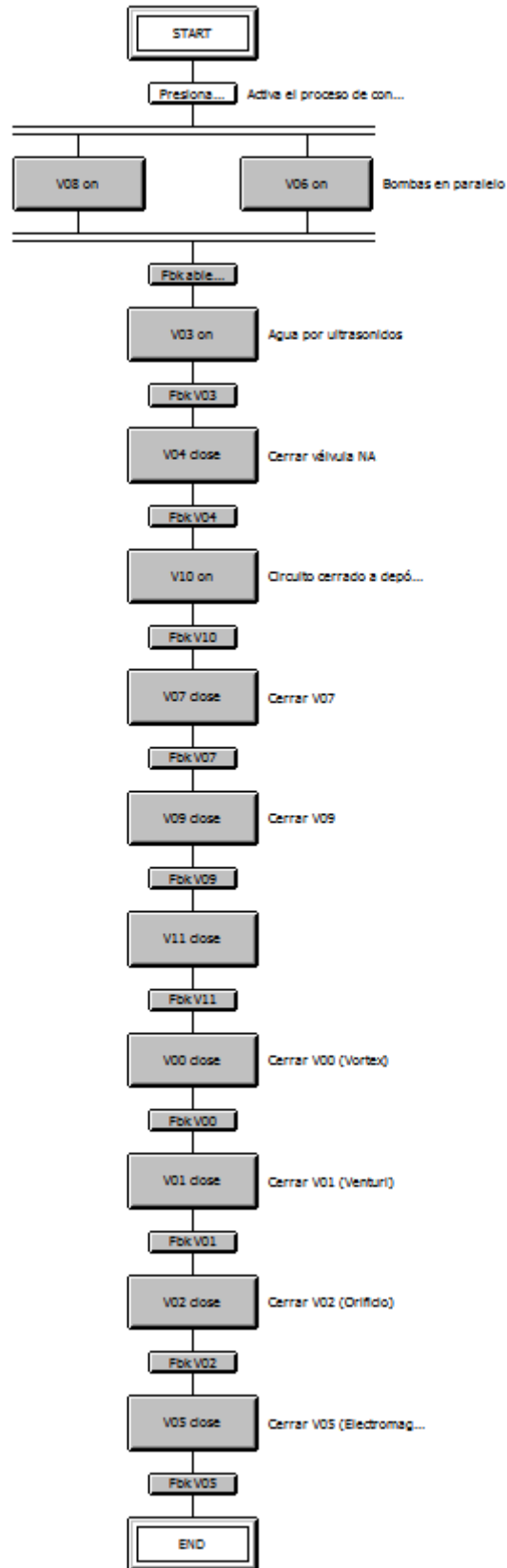


Figura 3.76: Vista general del proceso secuencial. Fuente: E.P.

Para añadir un poco más de detalle, se va a ahondar en la programación de las acciones y

condiciones del SFC. Como ejemplo, se toma el control de la Válvula 03. El funcionamiento es el mismo para todas las válvulas definidas en el diagrama de flujo.

Al entrar en el bloque de apertura de la válvula, se modifican dos variables. La primera de ellas, la apertura de la válvula deseada, estableciendo el valor de *Open* correspondiente a la válvula en 1. Por otro lado, también es necesario especificar que, si está abierta, no estará cerrada. Aunque es una redundancia es importante para tener un código depurado y funcional. Es por ello que la variable de *Close* se establece como *FALSE* o 0. Lo comentado en este párrafo se puede ver en detalle en la Figura 3.77.

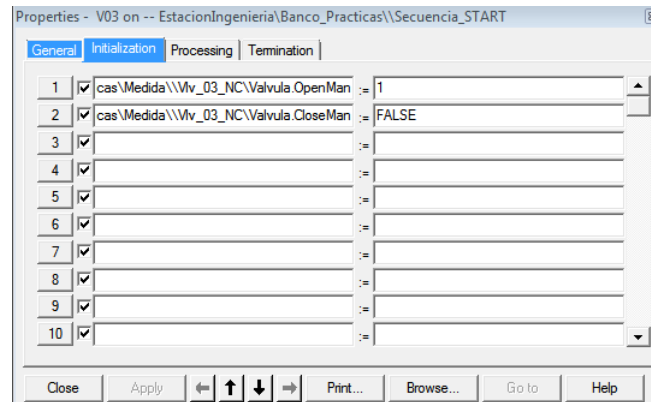


Figura 3.77: Acción de apertura de la Válvula 03. Fuente: E.P.

Para pasar de una acción a otra, es necesario cumplir la condición definida entre ambas. En este caso, se busca que el *feedback* de apertura de la válvula sea cierto⁶. Una vez se cumpla esta condición, se pasará a la siguiente acción, el cerrado de la válvula V04.

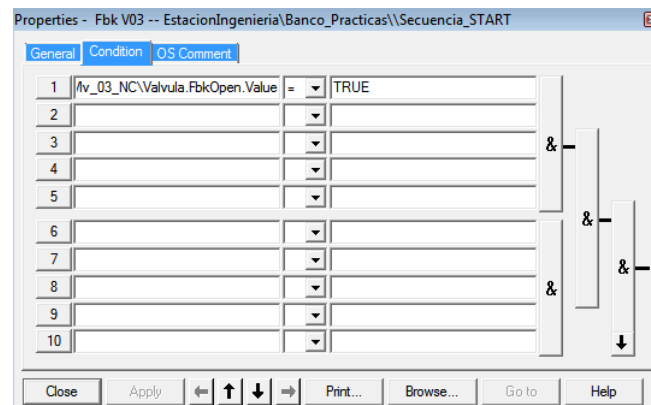


Figura 3.78: Condición de «*feedback open*» de la válvula 03. Fuente: E.P.

Una vez programado el esquema secuencial, es necesario compilarlo dentro del sistema operativo para poder verlo en la interfaz gráfica de WinCC. Al entrar a éste, se podrá ver un botón interactivo como el mostrado en la Figura 3.79. Al clicar en él, se activa el funcionamiento de la secuencia programada en el SFC.

⁶Como es evidente, si se desea cerrar una válvula en vez de abrirla, este *feedback* debería ser 0 y no 1.



Figura 3.79: Botón del SFC en la interfaz de WinCC. *Fuente: E.P.*

Al pulsar el botón RUN dentro de la interfaz del SFC, comenzará el proceso programado. En la Figura 3.80 el flujo dentro del esquema está en proceso, a la espera de recibir el *feedback* de apertura de las válvulas que indique bombas en paralelo. Una vez abiertas, se cumplirá la siguiente acción. Esto quedará indicado por colores:

- Verde oscuro: Acción ejecutada o condición cumplida.
- Verde claro: Próxima acción a realizar.
- Gris: Acción o condición no cumplida por el momento.

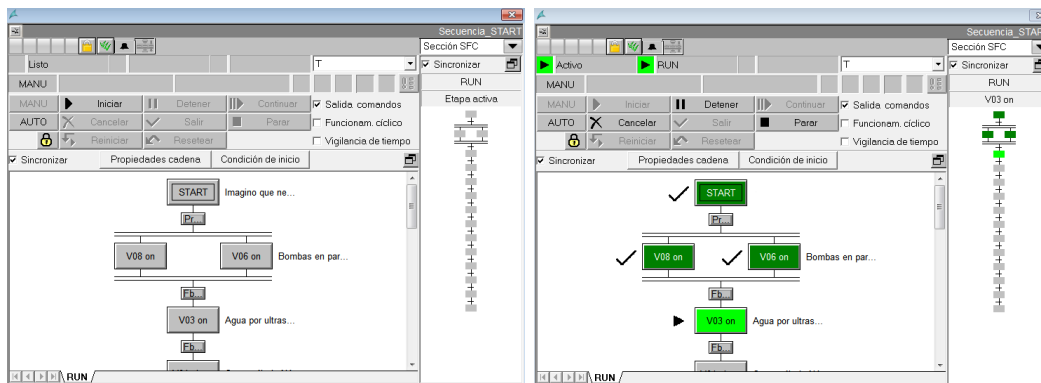


Figura 3.80: SFC de secuencia de arranque en funcionamiento. *Fuente: E.P.*

Aunque este SFC se ha creado como una secuencia de arranque del banco de ensayo, es posible lanzarlo en cualquier momento durante el uso del programa. Esto permitirá volver a las condiciones iniciales en cualquier momento, de manera sencilla, intuitiva y segura.

3.4.2. CFC de control por PID

Un CFC (Continuous Function Chart o Diagrama de Funciones Continuas) es un tipo de diagrama utilizado en el campo de la automatización y el control de procesos para modelar y controlar variables físicas continuas. Se utiliza principalmente en el diseño y análisis de sistemas de control, como controladores PID (Proporcional Integral Derivativo). El CFC representa gráficamente la relación entre una entrada y una salida continua a través de funciones matemáticas. Está compuesto por bloques funcionales que representan operaciones matemáticas, como sumas, multiplicaciones, integraciones y derivaciones. Estos bloques están interconectados para formar una representación visual de cómo se transforma la señal de entrada en la señal de salida.

El objetivo principal de un CFC es modelar y controlar el comportamiento de una variable física en función de la entrada y las condiciones del sistema. Por ejemplo, en el caso de un controlador PID para regular el nivel de un depósito de calibración, el CFC podría representar la relación entre el porcentaje de apertura de una válvula mariposa (entrada) y el nivel del depósito (salida).

Al utilizar un CFC, se pueden establecer las ecuaciones matemáticas y las relaciones de retroalimentación necesarias para el control de la variable física. Además, permite ajustar los parámetros del controlador, como las constantes proporcional, integral y derivativa, para lograr un control preciso y estable.

El CFC proporciona una representación visual clara y concisa de la relación entre la entrada y la salida, lo que facilita el diseño, análisis y ajuste de los controladores. También permite realizar simulaciones y análisis de respuesta en diferentes condiciones de operación.

La programación del PID, aunque sencilla a nivel teórico, adquiere cierta complejidad al tratar de adaptarla al lenguaje de programación específico de SIMATIC. A continuación, se va a explicar de manera general y detallada las partes que componen el CFC del PID.

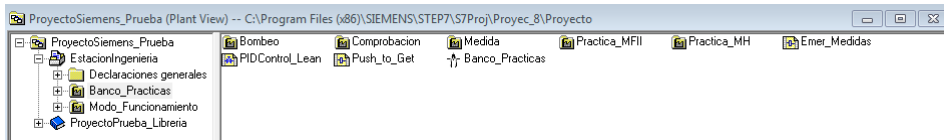


Figura 3.81: CFC dentro de la pantalla «Banco_Practicas». Fuente: E.P.

En primer lugar, es necesario comprender un PID. Un PID (Proporcional Integral Derivativo) es un algoritmo de control ampliamente utilizado en sistemas de control industrial para regular y estabilizar variables físicas. Está compuesto por tres términos principales: proporcional, integral y derivativo, que trabajan en conjunto para generar la señal de control adecuada.

1. **Término Proporcional (P):** El término proporcional da una respuesta de control proporcional al error presente entre el valor deseado y el valor medido de la variable controlada. Cuanto mayor sea el error, mayor será la contribución del término proporcional a la señal de control. Este término permite una respuesta rápida a las desviaciones de la variable controlada, pero puede generar oscilaciones o incluso inestabilidad si se configura incorrectamente.
2. **Término Integral (I):** El término integral acumula el error en el tiempo. Ayuda a eliminar el error en estado estacionario y a mejorar la precisión del control. El término integral se basa en la integral del error a lo largo del tiempo y su contribución a la señal de control es proporcional a la magnitud y la duración del error acumulado.
3. **Término Derivativo (D):** El término derivativo proporciona una respuesta al cambio en el error en cortos periodos de tiempo. Ayuda a anticipar las tendencias del error. El término derivativo se basa en la derivada del error y su contribución a la señal de control es proporcional a la velocidad de cambio del error. En el caso estudiado, no es necesario este término al tratarse de un sistema de primer orden.

La combinación de estos tres términos (P, I y D) en un controlador PID permite obtener una respuesta equilibrada, rápida y estable. Los parámetros del PID deben ajustarse cuidadosamente para adaptarse a las características y dinámicas del sistema controlado, con el fin de lograr un control óptimo de la variable física.

Dentro del contexto del control PID, se utilizan tres términos clave: PV (*Process Variable*), MV (*Manipulated Variable*) y SP (*Set Point*). Estos términos se refieren a las diferentes variables y valores involucrados en el proceso de control.

1. **Process Variable (PV):** La Variable de Proceso (PV) es la variable física que se mide o se controla en el sistema. También se conoce como la variable controlada. La PV es la variable que se desea mantener en un valor específico y estable a través del control, en este caso, el nivel en el depósito medido por el peso que calcula la célula de carga.
2. **Manipulated Variable (MV):** La Variable Manipulada (MV) es la variable de control que se ajusta o modifica para influir en la PV y lograr que se acerque al valor deseado. La MV se controla mediante la generación de una señal de control y afecta directamente el proceso. La MV es el resultado del cálculo realizado por el controlador PID y se utiliza para actuar sobre el sistema y lograr la regulación deseada de la PV. En el caso estudiado, esta variable es el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa.
3. **Set Point (SP):** El *Set Point* (SP) es el valor objetivo o deseado al que se desea llevar la PV. Es el valor de referencia al cual se desea que la PV se acerque y mantenga. El controlador PID compara continuamente la PV con el SP y ajusta la MV para minimizar la diferencia entre ambos. El SP en este caso se define manualmente en la interfaz de WinCC con el valor deseado de peso en el depósito de calibración.

Un esquema de control típico puede verse en la Figura 3.82. Éste, va a ser implementado en Simatic mediante un CFC, como se explica más adelante.

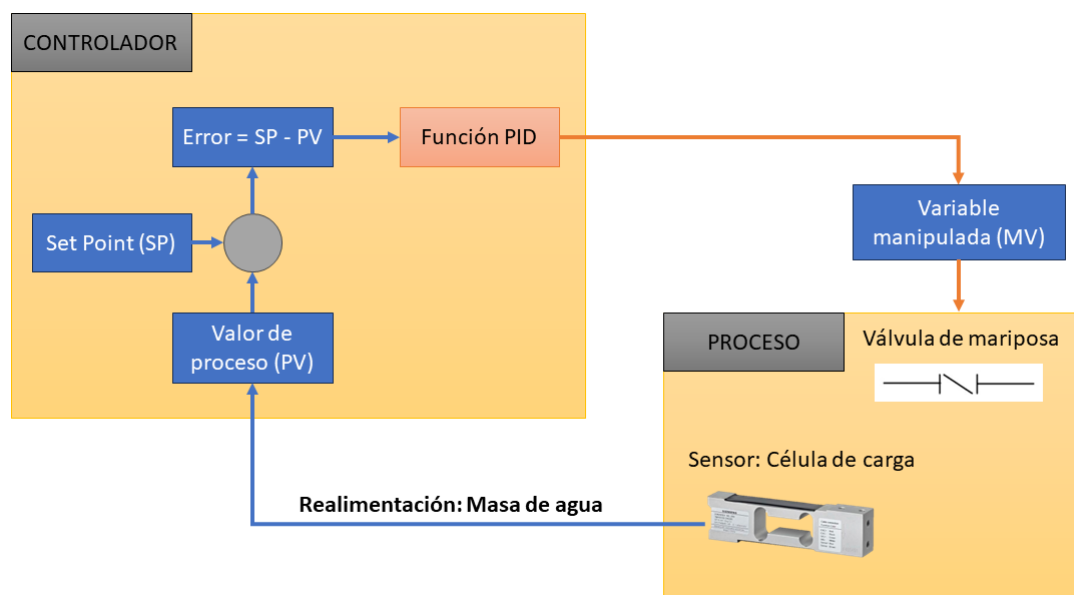


Figura 3.82: Esquema de control básico de célula de carga y válvula de mariposa mediante PID.
Fuente: E.P.

La interconexión entre célula de carga, PID y mariposa puede verse de manera general en la Figura 3.83.

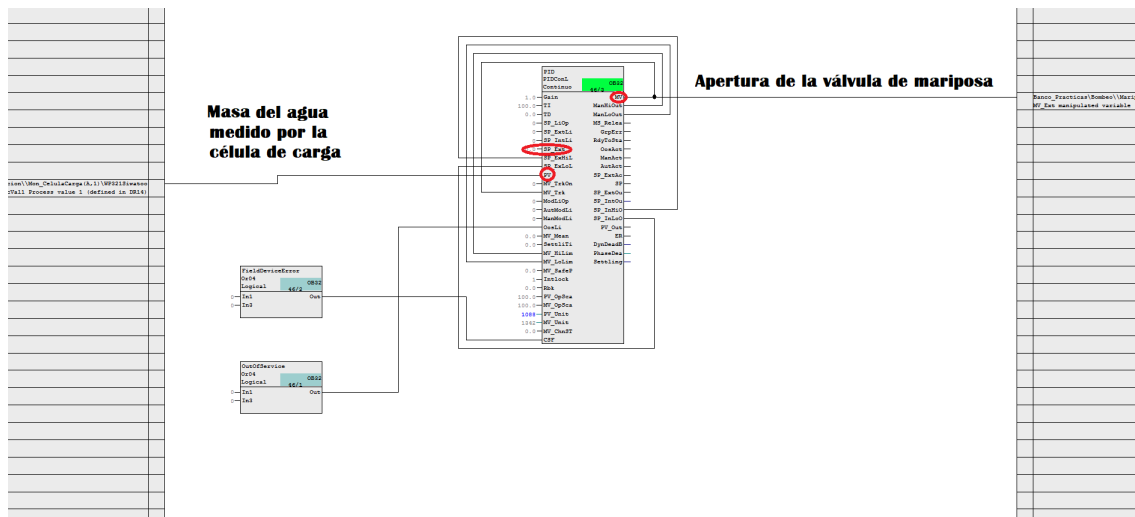


Figura 3.83: Vista general del proceso de control del PID. Fuente: E.P.

Como se ha podido ver, el PID tiene una gran cantidad de variables en su definición. A continuación, se enumeran y explican brevemente las más importantes:

- Entradas:
 - *Gain*: Ganancia. Corresponde al término proporcional del PID.
 - *TI*: Término integral.
 - *TD*: Término derivativo.
 - *SP_Ext*: *Set Point*. También se puede establecer su valor dentro de la interfaz SCADA.
 - *SP_ExHiL*: Límite superior del *Set Point*.
 - *SP_ExLoL*: Límite inferior del *Set Point*.
 - *PV*: Entrada de la variable de proceso, conectado con la salida de la célula de carga.
 - *MV_Trk*: Control de la variable manipulada, utilizada para comparar y establecer el error del PID.
 - *MV_HiLim*: Límite superior de la variable manipulada.
 - *MV_LoLim*: Límite inferior de la variable manipulada.
 - *PV_Unit*: Unidades de la variable de proceso. En este caso, se corresponde con kg, que equivale al número 1088 en Simatic Manager.
 - *MV_Unit*: Unidades de la variable manipulada. Corresponde con porcentaje de apertura, número 1342.
- Salidas:
 - *MV*: Variable manipulada. Se conecta directamente con la entrada de control de la válvula de mariposa.

- ManHiOut*, *ManLoOut*, *SP_InHiO* y *SP_InLoO*: Las limitaciones de la variable manipulada en modo manual, *ManLoLim* y *ManHiLim*, se copian a los parámetros de salida *ManLoOut* y *ManHiOut* para que puedan ser interconectados posteriormente al controlador secundario como límites del *Set Point* *SP_ExtLoLim* y *SP_ExtHiLim*. Si se desea utilizar los mismos pares de límites para el modo "manual" y "automático", es posible interconectar los parámetros de salida *ManLoOut* y *ManHiOut* a los parámetros de entrada *MV_LoLim* y *MV_HiLim* del mismo bloque y así controlar los límites para la variable manipulada. En la mayoría de los casos, el rango de control completo de una válvula puede pasarse en modo "manual". Luego, interconectar los parámetros de salida *ManLoOut* y *ManHiOut* a los parámetros de entrada *LoScale* y *HiScale* del bloque de canal de salida analógica asignado⁷.

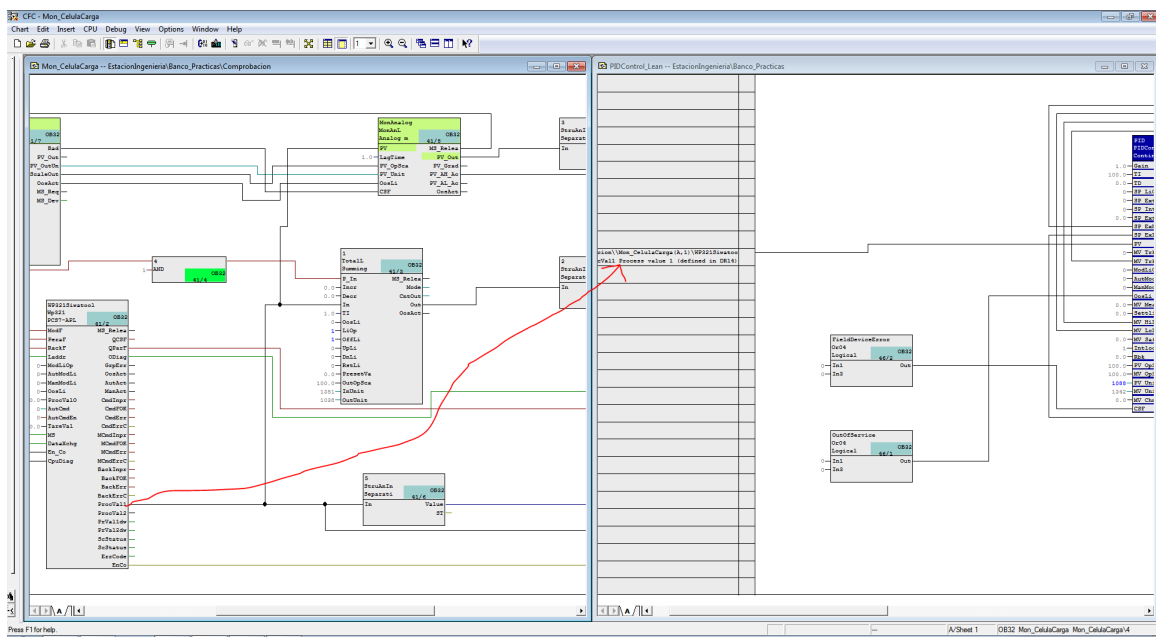


Figura 3.84: Conexión de la salida de la célula de carga con el *Process Value* del PID. Fuente: E.P.

⁷Precaución: Si las válvulas tienen una posición neutral abierta (*SafePos* = 1), esta interconexión debe cruzarse: *LoScale* = *ManHiOut* y *HiScale* = *ManLoOut*. En el controlador, el 0% siempre se interpreta como la válvula cerrada y el 100% como la válvula abierta, pero luego el bloque de canal emite una señal de control del 0% para una variable manipulada del controlador del 100%.

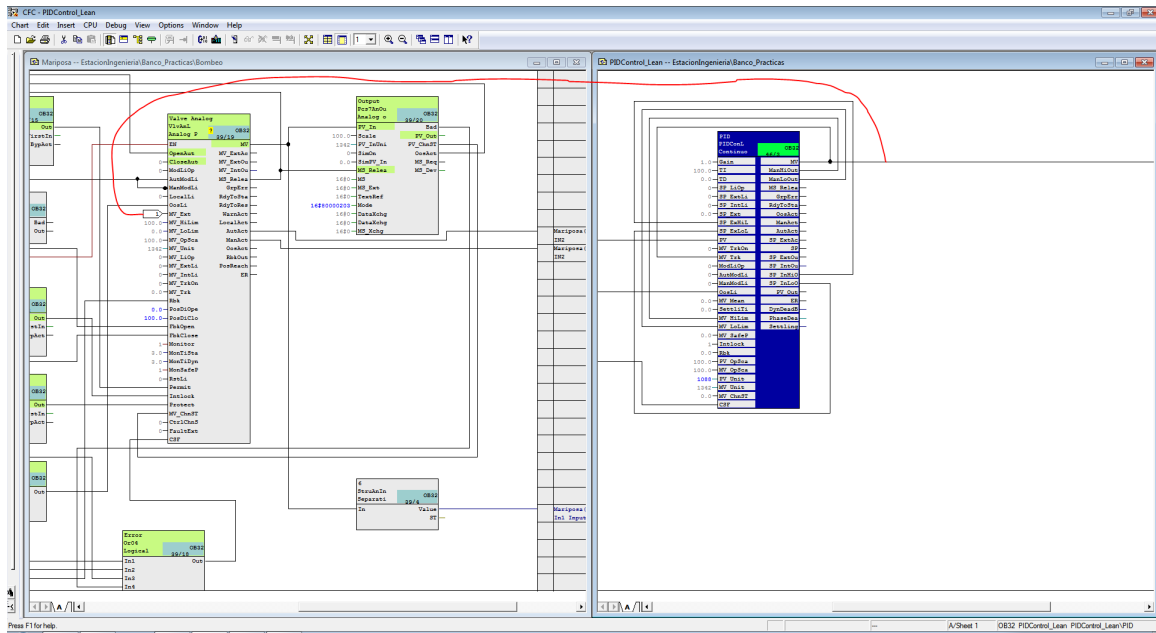


Figura 3.85: Conexión de la entrada de la válvula de mariposa con el *Manipulated Variable* del PID. Fuente: E.P.

Hay un parámetro que no se ha especificado anteriormente, llamado *NormPV* que marca el máximo y mínimo valor a calcular para el PV. Esto optimiza el funcionamiento del PID, evitándole buscar valores fuera de dicho intervalo.

Properties - Block -- PIDControl_Lean\PID

#	Name	I/O	T...	Value
1	EN	IN	B...	1
2	NegGain	IN	ST...	
3	NegGain.Value	IN	...	0
4	NegGain.ST	IN	...	16#80
5	Gain	IN	ST...	
6	Gain.Value	IN	...	1.0
7	Gain.ST	IN	...	16#FF
8	NormPV	IN	ST...	
9	NormPV.High	IN	...	15.0
10	NormPV.Low	IN	...	0.0
11	NormMV	IN	ST...	
12	NormMV.High	IN	...	100.0
13	NormMV.Low	IN	...	0.0
14	TI	IN	ST...	
15	TI.Value	IN	...	100.0
16	TI.ST	IN	...	16#FF
17	IntHoldPos	IN	ST...	
18	IntHoldPos.Value	IN	...	0
19	IntHoldPos.ST	IN	...	16#80
20	IntHoldNeg	IN	ST...	
21	IntHoldNeg.Value	IN	...	0
22	IntHoldNeg.ST	IN	...	16#80
23	TD	IN	ST...	
24	TD.Value	IN	...	0.0
25	TD.ST	IN	...	16#FF
26	DiffGain	IN	ST...	
27	DiffGain.Value	IN	...	5.0
28	DiffGain.ST	IN	...	16#80

Figura 3.86: Valores límite de la célula de carga (PV). Fuente: E.P.

Una vez programado el CFC, y al compilar el OS, aparecerá el botón de la Figura 3.87 en la interfaz del WinCC.



Figura 3.87: Botón del CFC en la interfaz de WinCC. Fuente: E.P.

Al clicar en él, se abrirá la ventana siguiente:

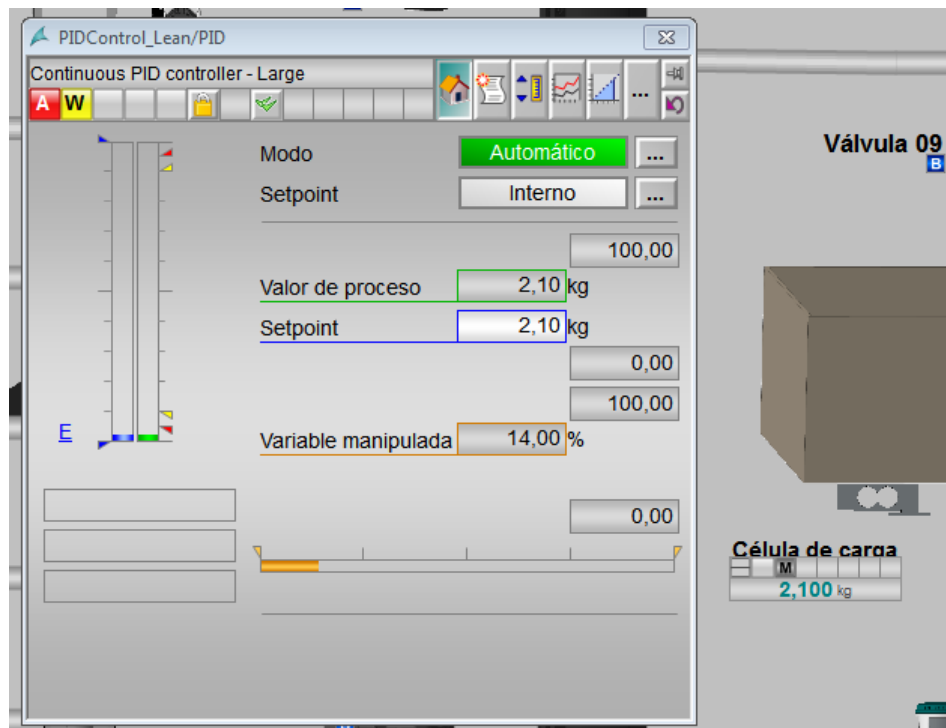


Figura 3.88: Ventana *Home* del PID. PV, SP y MV. Fuente: E.P.

Tras seleccionar el *Modo* del PID como *Automático*, con un *Setpoint Interno*, únicamente queda seleccionar el valor de peso deseado en la célula de carga. El PID regulará automáticamente la apertura de la válvula para mantener constante el peso de agua dentro del depósito (con válvulas 09 y 11 abiertas) en el valor seleccionado.

En la Figura 3.89 se pueden ver todos los parámetros que se pueden controlar desde WinCC dentro del PID.

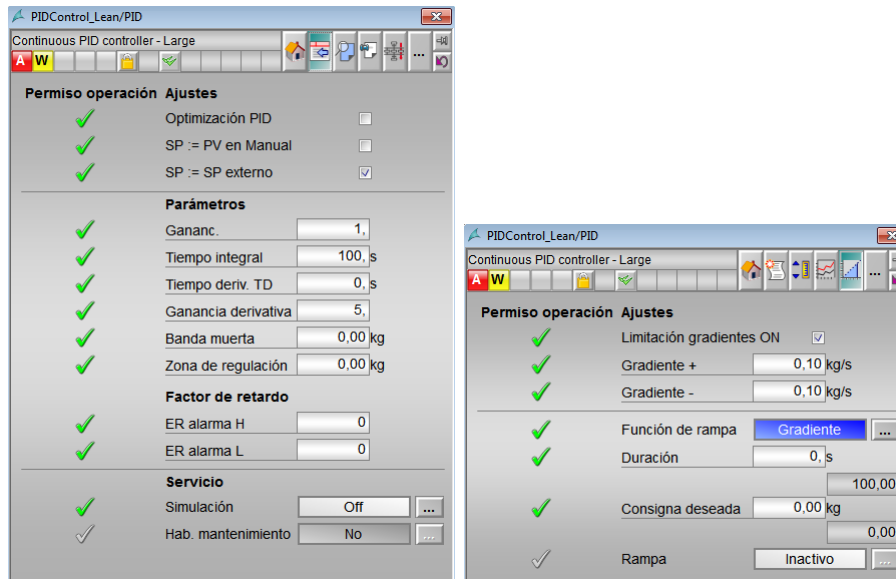


Figura 3.89: Parámetros de ajuste del PID. Fuente: E.P.

En el apartado de parámetros se puede seleccionar la ganancia, el TI, o el TD de manera cómoda, sin necesitar de editar el CFC. El usuario puede ajustar estos parámetros a su conveniencia.

Por otro lado, es posible establecer una limitación de gradientes que evite una apertura o cerrado brusco de la válvula. Establecer el gradiente en un rango de 0,10 kg/s hace que el *Set Point* se alcance de manera controlada.

Es importante establecer el *Modo* de la válvula de mariposa también en *Automático* para que pueda ser controlada automáticamente.

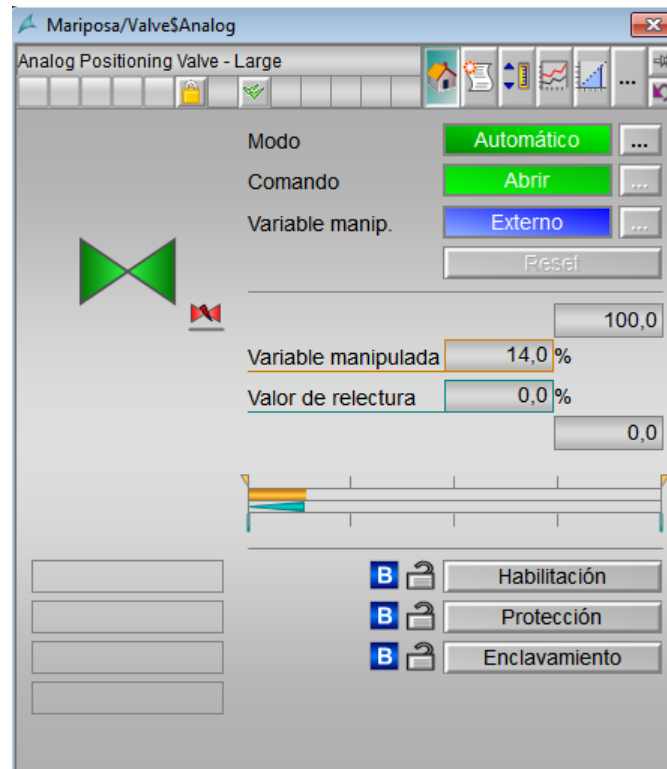


Figura 3.90: Configuración de los parámetros de la válvula de mariposa. Fuente: E.P.

Se muestra a continuación una imagen que justifica el PID programado para este objetivo. Funcionamiento básico y ecuaciones.

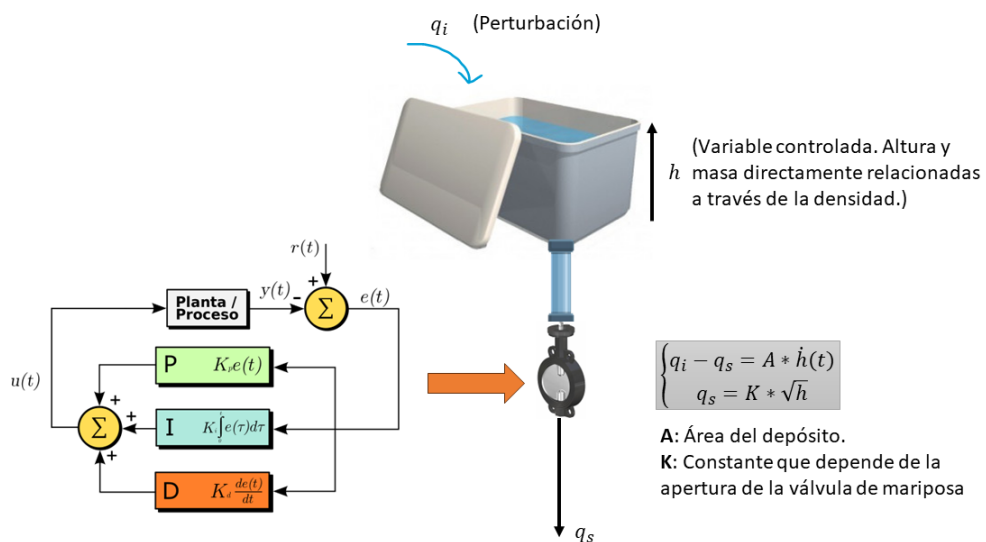


Figura 3.91: Ecuaciones vaciado depósito. Fuente: E.P.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

La realización de pruebas experimentales es un aspecto crucial de la investigación científica, así como el análisis de estas pruebas. Los resultados del experimento proporcionan las bases de cualquier conclusión o descubrimiento científico. Se utilizan para confirmar o descartar hipótesis, para validar teorías, y para establecer la veracidad de cualquier descubrimiento científico novedoso. Los experimentos diseñados adecuadamente deberían ser fiables y precisos para poder obtener datos de ellos, y ser analizados e interpretados de la mejor manera posible.

La importancia de las estas pruebas y sus análisis resulta particularmente evidente en los campos de la ingeniería. En la mayoría de casos, los resultados experimentales se utilizan para validar el desempeño de nuevos productos, tecnologías o sistemas. En otros casos, como el que se presenta en este trabajo, se busca comprobar el correcto funcionamiento de una tecnología existente pero que no funciona con la eficacia que debería. El análisis de estos resultados puede ayudar a identificar cualquier problema o áreas que necesiten mejora, y guiar el desarrollo de futuros diseños o modificaciones. Además, el testeo y análisis puede ayudar a establecer la seguridad y fiabilidad de estos sistemas antes de ponerse en servicio. Las pruebas y los resultados son, por lo tanto, componentes esenciales de la ciencia.

En esta sección, se va a profundizar en la descripción de las pruebas realizadas y en el análisis de los resultados obtenidos. También se comparan las curvas características, interpretando los datos de las mismas. El objetivo es proporcionar una explicación comprensible del desempeño del sistema bajo distintas condiciones de operación. Analizando el resultado de estas pruebas, se identificarán las fuerzas y debilidades del sistema, y se exploran oportunidades de optimización.

4.1. Descripción de las pruebas realizadas

Para evaluar a fondo el rendimiento del banco de pruebas, se han realizado una variedad de tests que involucran diversas técnicas de medida. El caudal de agua circulando por la instalación se ha medido con los cuatro caudalímetros de la instalación, todos disponibles en WINCC: Coriolis, Vortex, Ultrasonico y Electromagnético. Además, las pruebas involucran la medida de la altura manométrica, las revoluciones por minuto de las bombas, así como su potencia y rendimiento. Se han obtenido estos parámetros variando la apertura de la válvula de mariposa desde el 100 % (máximo caudal) hasta el 24 % (mínima apertura, caudal cero).

Las pruebas se han realizado con diferentes velocidades de giro para evaluar el desempeño del banco bajo condiciones variables. Específicamente, las pruebas que se han realizado son las siguientes:

- Bomba 1 individualmente a 1200rpm, 1740rpm, 2320rpm y 2860rpm.
- Las dos bombas en paralelo, ambas a 2320rpm.
- Las dos bombas en paralelo, bomba 1 a 2320rpm y bomba 2 a 2002rpm.
- Las dos bombas en serie, ambas a 2320rpm.

Las bombas en serie y en paralelo son dos configuraciones comunes utilizadas en sistemas de bombeo para lograr diferentes objetivos en términos de caudal y presión. La diferencia principal

entre ellas radica en cómo se combinan las bombas y cómo afecta esto al caudal y la presión del sistema.

En una configuración de bombas en serie, las bombas se conectan en línea, es decir, la salida de una bomba se conecta a la entrada de la siguiente. Esto significa que el caudal se mantiene constante en todas las bombas, pero la presión total aumenta a medida que se agregan más bombas. En otras palabras, la presión total generada por el sistema de bombeo es igual a la suma de las presiones generadas por cada bomba individualmente. Por lo tanto, en una configuración en serie, se obtiene un aumento de presión pero el caudal se mantiene constante.

Por otro lado, en una configuración de bombas en paralelo, cada bomba se conecta en una tubería separada que se une en un solo punto de salida. En esta configuración, el caudal total del sistema es igual a la suma de los caudales de cada bomba individualmente, mientras que la presión se mantiene constante en todas las bombas. Esto significa que al agregar más bombas en paralelo, se obtiene un aumento del caudal total pero la presión se mantiene constante.

Este proyecto se ha desarrollado durante un prolongado periodo de tiempo, y es por ello que se generaron unos nuevos ensayos, realizados tras la puesta a punto total del banco de ensayo. En ese caso, las pruebas realizadas han sido:

- Bomba 1 individualmente a 1200rpm, 1740rpm y 2320rpm.
- Las dos bombas en paralelo, ambas a 1200rpm y 1740rpm.
- Las dos bombas en paralelo, bomba 1 a 1200rpm y bomba 2 a 1740rpm.
- Las dos bombas en serie, ambas a 1200rpm y 1740rpm.
- Las dos bombas en serie, bomba 1 a 1200rpm y bomba 2 a 1740rpm.

El rango de pruebas realizadas permite una evaluación exhaustiva del rendimiento del sistema en condiciones variables, y proporciona información valiosa sobre las capacidades y limitaciones del sistema. Al analizar los datos recopilados de las pruebas, es posible comparar las características de las diferentes bombas, evaluar la eficiencia del sistema y valorar el rendimiento general del banco de pruebas. Los resultados de las pruebas son vitales para proporcionar una comprensión completa del sistema, lo que permite una toma de decisiones más informada en futuros experimentos y aplicaciones.

4.2. Análisis de los resultados obtenidos

En esta sección, se comparan los datos obtenidos con las condiciones definidas en el apartado anterior, resaltando de las conclusiones se obtienen. No obstante, se ahondará en esto en el apartado de interpretación de los datos. Se ha estudiado el rendimiento frente al caudal, la altura manométrica frente al caudal, así como las curvas de isorendimiento de las bombas. Estas se mostrarán comparadas en el apartado siguiente.

La primera fase de la recopilación de datos se llevó a cabo operando la bomba 1 en modo individual (con las válvulas 08, 04 y 10 abiertas) funcionando a 1200rpm [Tabla 4.1], 1740rpm [Tabla 4.2], 2320rpm [Tabla 4.3] y 2860rpm [Tabla 4.4]. Durante esta fase de pruebas, se compararon los resultados obtenidos por los cuatro caudalímetros disponibles para estudiar su comportamiento individual. Entre los caudalímetros evaluados, el de tipo Coriolis resultó ser el más preciso y confiable. Esto se ha podido verificar experimentalmente midiendo el tiempo que tarda en llenarse

un volumen fijo de agua en el depósito inferior, y pesando ese volumen con la célula de carga. Estas pruebas permitieron analizar el comportamiento individual de la bomba y los caudalímetros, y sentaron las bases para la evaluación más detallada del rendimiento del banco de pruebas. También se ha estudiado la Altura Manométrica, potencia y rendimiento, y comparado con el fabricante, como se puede ver en la sección 4.3, Comparación de las curvas características.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Vórtex [m ³ /h]	Ultrasonidos [m ³ /h]	Electromagnético [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	2,109	3,5	1,7	2	5,623	1199,755	32,29	18,021
95	2,007	0,9	1,7	1,97	5,661	1199,929	30,93	17,011
90	1,936	0	1,72	1,9	5,68	1199,929	29,964	16,547
85	1,669	0	1,5	1,63	5,708	1199,929	25,903	14,235
80	1,202	0	0,93	1,02	5,716	1199,929	16,396	8,94
75	0,345	0	0	0,33	5,825	1199,929	5,464	2,951
70	0	0	0	0	5,849	1199,929	0	0

Tabla 4.1: Bomba 1 individual a 1200rpm.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Vórtex [m ³ /h]	Ultrasonidos [m ³ /h]	Electromagnético [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	3,062	3,08	2,71	3,02	11,349	1739,845	94,606	26,855
95	2,975	2,98	2,6	2,9	11,383	1739,845	92,173	26,436
90	2,902	2,88	2,65	2,84	11,395	1739,845	90,01	25,746
85	2,491	2,48	2,3	2,44	11,474	1739,845	77,858	22,298
80	1,658	0	1,42	1,64	11,532	1739,845	52,05	14,843
75	0,764	0	0,65	0,76	11,745	1739,845	24,422	6,873
70	0,117	0	0	0	11,757	1739,845	3,754	1,066
65	0	0	0	0	11,76	1740,019	0	0

Tabla 4.2: Bomba 1 individual a 1740rpm.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Vórtex [m ³ /h]	Ultrasonidos [m ³ /h]	Electromagnético [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	4,342	4,37	3,9	4,24	19,556	2319,91	231,164	37,154
95	4,173	4,15	3,78	4,05	19,631	2319,91	223,02	36,259
90	3,983	3,98	3,53	3,91	19,682	2319,91	213,389	34,677
85	3,464	3,51	3,17	3,4	19,857	2319,91	187,23	30,759
80	2,51	2,5	2,28	2,47	20,048	2319,91	136,976	22,694
75	1,642	0	1,46	1,64	20,229	2319,91	90,441	15,151
70	0,427	0	0,01	0,41	20,41	2319,91	23,697	3,985
65	0	0	0	0	20,43	2319,91	0	0

Tabla 4.3: Bomba 1 individual a 2320rpm.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Vórtex [m ³ /h]	Ultrasonidos [m ³ /h]	Electromagnético [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	5,54	5,43	4,86	5,42	28,652	2859,825	426,88	43,433
95	5,221	5,23	4,56	5,12	29,058	2859,825	413,022	42,675
90	5,067	5,08	4,63	4,99	29,145	2859,802	402,003	41,527
85	4,496	4,53	4,05	4,41	29,455	2859,825	360,501	37,907
80	3,581	3,58	3,31	3,51	29,773	2859,825	290,193	31,224
75	2,762	2,79	2,52	2,72	30,105	2859,825	226,345	24,705
70	1,656	0,85	1,61	1,65	30,403	2859,825	137,088	15,301
65	0,39	0	0	0,38	30,644	2859,825	32,691	3,743
60	0,137	0	0	0	30,523	2859,825	11,358	1,311
55	0	0	0	0	30,57	2859,825	0	0

Tabla 4.4: Bomba 1 individual a 2860rpm.

Aunque los datos se analizarán en detalle más adelante, inicialmente todo indica que se obtienen unos valores coherentes y debidamente relacionados. A mayor apertura de mariposa, se puede

obtener un mayor caudal y una menor altura manométrica. El rendimiento y la potencia también son proporcionales al caudal obtenido.

El segundo grupo de ensayos se realizó con el objetivo de obtener las curvas de isrendimiento del banco. El estudio de las curvas de isrendimiento es importante ya que permite el análisis de la habilidad del sistema de afrontar cambios repentinos en el caudal o la presión. Examinando estas curvas, será posible indentificar el punto óptimo de operación del sistema, así como limitaciones potenciales o ineficiencias. Esta información puede usarse para optimizar el desempeño, y asegurar que es posible alcanzar los requisitos de la aplicación.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	1,823	4,63	1075	22,97	15,249
95	1,813	4,659	1075	23,002	15,249
90	1,762	4,692	1075	22,498	15,039
85	1,754	5,707	1200	27,251	15,088
80	1,7	10,458	1650	48,4	15,158
75	1,681	17,116	2150	78,317	15,018
70	1,655	27,11	2700	122,123	15,064

Tabla 4.5: Bomba 1 individual a 15 % de rendimiento.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	2,376	7,029	1350	45,465	20,57
95	2,372	7,38	1380	47,642	20,411
90	2,315	7,503	1390	47,284	20,132
85	2,238	8,684	1500	52,899	19,826
80	2,197	15,065	2000	90,11	19,945
75	2,222	22,306	2450	134,902	20,09
70	2,115	30,134	2859,825	173,518	19,682

Tabla 4.6: Bomba 1 individual a 20 % de rendimiento.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	2,874	9,659	1600	75,564	25,246
95	2,844	10,035	1625	77,702	25,3
90	2,836	10,604	1675	81,881	25,152
85	2,746	12,232	1800	91,421	24,666
80	2,791	20,497	2350	155,582	25,05
75	2,847	27,776	2750	215,255	24,88
70	2,115	30,134	2860	173,518	19,682

Tabla 4.7: Bomba 1 individual a 25 % de rendimiento.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	3,42	12,673	1850	118,001	29,862
95	3,394	13,405	1900	123,873	29,817
90	3,424	14,372	1970	133,978	30,148
85	3,289	16,371	2100	146,578	29,387
80	3,462	26,67	2700	251,315	29,681
75	3,075	29,863	2860	250,008	27,368

Tabla 4.8: Bomba 1 individual a 30 % de rendimiento.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	4,001	16,121	2100	175,583	34,762
95	4,01	17,653	2200	192,681	34,957
90	4,021	18,436	2250	201,778	34,811
85	4,091	23,609	2550	262,923	34,824
80	3,805	29,676	2860	307,378	32,598

Tabla 4.9: Bomba 1 individual a 35 % de rendimiento.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	4,897	22,938	2550	305,77	39,768
95	4,922	25	2650	334,987	39,937
90	4,9	25,953	2700	346,155	39,492
85	4,699	29,228	2860	373,833	39,051

Tabla 4.10: Bomba 1 individual a 40 % de rendimiento.

Por último, se ha estudiado el comportamiento de las bombas, trabajando en conjunto. En paralelo (abiertas válvulas 06, 08, 04 y 10) y en serie (abiertas válvulas 07, 04 y 10). En este caso, no se ha considerado relevante tomar datos de todos los caudalímetros, ya que se busca estudiar el comportamiento de las curvas, y no de los medidores. Se emplea por lo tanto el Coriolis.

Las dos tablas siguientes muestran los datos de la instalación para bombas en paralelo, con mismo régimen de giro, y para regímenes de giro distintos.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	4,786	18,541	2319,91	241,543	38,585
97	4,721	18,577	2319,91	238,768	38,287
94	4,679	18,608	2319,91	237,035	37,984
91	4,655	18,617	2319,91	235,908	37,702
88	4,542	18,739	2319,91	231,711	37,345
85	4,261	18,888	2319,91	219,108	35,218
82	3,834	19,16	2319,91	199,988	32,294
79	3,3	19,456	2319,91	174,766	28,577
76	2,863	19,622	2319,91	152,913	25,035
73	2,396	19,723	2319,91	128,622	21,273
70	1,558	19,81	2319,91	84,03	13,94
67	0,76	20,03	2319,91	41,438	6,875
64	0,456	20,078	2319,91	24,941	4,167
61	0,311	20,093	2319,91	17,02	2,869
58	0,262	20,101	2319,91	14,328	2,39
55	0,247	20,107	2319,91	13,498	2,275
52	0,248	20,112	2319,91	13,598	2,28
49	0,223	20,099	2319,91	12,199	2,048
46	0,253	20,088	2319,91	13,827	2,322
43	0,296	20,087	2319,91	16,159	2,697
40	0,148	20,111	2319,91	8,129	1,354
37	0,122	20,131	2319,91	6,683	1,115
34	0,12	20,124	2319,91	6,601	1,102
31	0,113	20,12	2319,91	6,206	1,04
28	0	20,137	2319,91	0	0

Tabla 4.11: Bombas en paralelo (Bomba 1 2320rpm y Bomba 2 2320rpm).

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	4,645	17,731	2319,91	224,19	35,249
97	4,583	17,765	2319,91	221,655	35,039
94	4,558	17,795	2319,91	220,818	34,772
91	4,543	17,825	2319,91	220,439	34,87
88	4,429	17,872	2319,91	215,493	33,971
85	4,158	18,041	2319,91	204,194	32,495
82	3,734	18,289	2319,91	185,909	29,612
79	3,164	18,582	2319,91	160,032	25,587
76	2,736	18,822	2319,91	140,19	22,425
73	2,267	19,033	2319,91	117,438	18,93
70	1,521	19,427	2319,91	80,448	13,093
67	0,744	19,712	2319,91	39,947	6,504
64	0,43	19,774	2319,91	23,123	3,804
61	0,298	19,786	2319,91	16,041	2,635
58	0,257	19,787	2319,91	13,839	2,267
55	0,23	19,763	2319,91	12,396	2,038
52	0,219	19,754	2319,91	11,785	1,939
49	0,238	19,749	2319,91	12,804	2,108
46	0,279	19,744	2319,91	15,012	2,475
43	0,15	19,76	2319,91	8,091	1,336
40	0,112	19,758	2319,91	6,035	0,99
37	0,113	19,748	2319,91	6,072	1,003
34	0	19,765	2319,91	0	0

Tabla 4.12: Bombas en paralelo (Bomba 1 2320rpm y Bomba 2 2002rpm).

En estas dos últimas tablas que se muestran a continuación, se analiza la bomba 1 y la bomba 2 por separado, con las mismas condiciones de trabajo en serie.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	6,93	17,16	2319,91	323,738	50,789
97	6,858	17,159	2319,91	320,326	50,347
94	6,807	17,205	2319,91	318,788	50,155
91	6,791	17,226	2319,91	318,454	50,059
88	6,702	17,286	2319,91	315,384	49,658
85	6,479	17,517	2319,91	308,929	48,604
82	6,153	17,853	2319,91	299,046	47,378
79	5,777	18,196	2319,91	286,147	45,36
76	5,433	18,48	2319,91	273,3	43,502
73	5,054	18,758	2319,91	258,087	41,348
70	4,617	19,043	2319,91	239,346	38,531
67	4,107	19,356	2319,91	216,425	35,163
64	3,515	19,663	2319,91	188,13	30,573
61	2,336	19,912	2319,91	126,647	20,97

Tabla 4.13: Bombas en serie (Bomba 1 2320rpm y Bomba 2 2002rpm). Bomba 1.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	6,932	32,048	2319,91	604,333	90,454
97	6,864	32,163	2319,91	600,641	90,356
94	6,807	32,211	2319,91	598,22	90,325
91	6,795	32,244	2319,91	595,862	89,694
88	6,704	32,424	2319,91	591,985	89,469
85	6,482	32,965	2319,91	582,415	88,35
82	6,153	33,732	2319,91	565,663	86,093
79	5,779	34,564	2319,91	544,053	83,06
76	5,433	35,261	2319,91	521,985	79,496
73	5,054	36,029	2319,91	495,268	75,937
70	4,622	36,79	2319,91	462,613	71,344
67	4,108	37,601	2319,91	420,017	65,113
64	3,515	38,393	2319,91	366,236	56,986
61	2,336	39,162	2319,91	250,147	39,487

Tabla 4.14: Bombas en serie (Bomba 1 2320rpm y Bomba 2 2002rpm). Bomba 2.

Los datos mostrados de la Tabla 4.1 hasta la 4.14 se tomaron en condiciones de funcionamiento limitadas. Hasta la etapa final del proyecto se presentaron limitaciones de caudal respecto al trabajo de Ignacio Pérez ([5]). No obstante, las curvas obtenidas cumplían con la del fabricante. La altura y rendimientos, graficados frente al caudal, se correspondían con los valores esperados.

Este problema se solucionó purgando el aire de la tubería, que debió quedar atrapado por el tiempo que estuvo parado el banco de ensayo. Para futuros trabajos, se explica a continuación cómo purgar el circuito hidráulico:

1. Quitar el tapón negro que hay en los purgadores de ambas tuberías PT100.
2. Dar suficiente caudal al proceso cómo para que se llenen las tuberías más anchas de agua por completo. En este caso, el purgado se realizó con la bomba 1 en modo individual a 2200rpm.
3. Con la bomba en funcionamiento, se desenrosca muy lentamente y con cuidado el purgador dorado hasta que salgan unas gotas de agua⁸. Esto significará que ya no queda agua en esa parte del circuito.
4. Repetir para el otro purgador, dejando al terminar el sistema de purga como estaba (enroscado y con los tapones puestos)

⁸Cuidado al purgar. Podría escaparse la válvula por la elevada presión, en especial en el primer tramo del circuito, e inundar el laboratorio. Se recomienda realizar esta purga con alguien en el ordenador para parar las bombas en caso de descontrol.



Figura 4.1: Imagen detalle de uno de los purgadores de las tuberías PT100. Fuente: E.P.

Se muestran a continuación los datos obtenidos del proceso una vez se ha purgado el sistema. En este caso, solo se estudiará el funcionamiento de la bomba 1 individual (hasta $2320rpm$), pues es suficiente para analizar las características nuevas del circuito.

Apertura mariposa %	Coriolis [m^3/h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	4,122	4,598	1199,755	51,601	28,874
95	4,132	4,609	1199,755	51,847	28,823
90	4,117	4,615	1199,755	51,726	28,467
85	4,129	4,608	1199,755	51,783	29,013
80	4,138	4,605	1199,755	51,872	28,863
75	4,115	4,613	1199,755	51,67	28,943
70	4,101	4,622	1199,755	51,598	28,781
65	4,067	4,64	1199,755	51,369	28,398
60	4,05	4,66	1199,755	51,373	28,496
55	4,018	4,685	1199,755	51,242	28,566
50	3,963	4,708	1199,755	50,788	27,909
45	3,887	4,766	1199,755	50,429	27,657
40	3,703	4,873	1199,755	49,12	27,203
35	2,939	5,235	1199,755	41,881	23,187
34	1,686	5,607	1199,755	25,739	14,125
33	1,481	5,627	1199,755	22,687	12,302
32	1,185	5,638	1199,755	18,189	9,933
31	0,875	5,648	1199,755	13,458	7,356
30	0,711	5,678	1199,755	10,987	5,822
28	0,226	5,722	1199,755	3,515	1,841
27	0	5,745	1199,755	0	0

Tabla 4.15: Bomba 1 individual a $1200rpm$ post-purga.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	6,073	8,757	1739,845	144,758	40,739
95	6,02	8,77	1739,845	143,736	40,788
90	6,04	8,731	1739,845	143,568	40,685
85	6,054	8,727	1739,845	143,831	40,445
80	6,041	8,734	1739,845	143,618	40,442
75	6	8,739	1739,845	142,734	40,706
70	5,953	8,766	1739,845	142,057	40,379
65	5,947	8,798	1739,845	142,421	40,142
60	5,898	8,827	1739,845	141,715	40,476
55	5,83	8,865	1739,845	140,683	39,902
50	5,786	8,95	1739,845	140,981	39,943
45	5,629	9,076	1739,845	139,076	39,773
40	5,388	9,392	1739,845	137,764	38,631
38	5,133	9,621	1739,845	134,441	38,309
36	4,746	9,984	1739,845	128,988	36,665
34	3,997	10,566	1739,845	114,96	33,012
32	2,868	11,196	1739,845	87,395	24,959
30	1,403	11,389	1739,845	43,51	12,289
28	0,544	11,511	1739,845	17,037	4,715
26	0,123	11,597	1739,845	3,884	0,98
25	0	11,622	1739,845	0	0

Tabla 4.16: Bomba 1 individual a 1740rpm post-purga.

Apertura mariposa %	Coriolis [m ³ /h]	Altura [m]	Revoluciones [rpm]	Potencia [W]	Rendimiento %
100	7,591	13,64	2319,91	281,884	44,291
95	7,608	13,802	2319,91	285,846	44,732
90	7,602	13,741	2319,91	284,37	44,588
85	7,602	13,806	2319,91	285,702	44,732
80	7,606	13,842	2319,91	286,604	44,665
75	7,611	13,91	2319,91	288,215	45,001
70	7,615	14,039	2319,91	291,041	45,562
65	7,596	14,204	2319,91	293,717	45,961
60	7,607	14,434	2319,91	298,901	46,563
55	7,602	14,655	2319,91	303,27	47,675
50	7,606	15,091	2319,91	312,47	48,798
45	7,591	15,567	2319,91	321,681	50,428
40	7,262	16,073	2319,91	317,74	50,178
38	6,971	16,303	2319,91	309,368	48,96
36	6,513	16,998	2319,91	301,363	47,337
34	5,432	18,12	2319,91	267,923	42,949
32	3,914	19,229	2319,91	204,89	33,171
30	2,166	19,783	2319,91	116,666	19,422
29	1,385	19,913	2319,91	75,054	12,403
28	0,841	20,036	2319,91	45,865	7,631
27	0,482	20,134	2319,91	26,428	4,43
26	0,252	20,194	2319,91	13,878	2,382
25	0,113	20,238	2319,91	6,227	1,084
24	0	20,252	2319,91	0	0

Tabla 4.17: Bomba 1 individual a 2320rpm post-purga.

Se puede apreciar claramente el aumento de caudal obtenido antes y después de la purga en el banco de ensayo (comparar, por ejemplo, tablas 4.2 y 4.16).

4.3. Comparación de las curvas características

Como parte del proceso de análisis y ensayo de las bombas, la comparación de las curvas características obtenidas frente a las proporcionadas por el fabricante es un aspecto indispensable. Estas curvas son una representación gráfica del comportamiento de la bomba bajo diferentes condiciones de operación. Comparando las curvas proporcionadas por GRUNDFOS con las obtenidas en los experimentos, se puede evaluar la precisión de la información e identificar posibles discrepancias.

Esta sección se centra en la comparación de dichas curvas características, analizando sus similitudes y diferencias. Este análisis permite obtener un mayor entendimiento de la bomba y de su capacidad de trabajo, pudiendo determinar así si son válidas para el trabajo que se espera de ellas.

Las curvas características se han obtenido comparando aquellas que se forman a partir de las tablas de la sección 4.2 y aquellas proporcionadas por el fabricante [4]. En este apartado se muestran únicamente las gráficas más relevantes del ensayo. No obstante, en el Anexo A se pueden ver todas las tablas que se han estudiado de manera individual, así como las curvas oficiales del fabricante.

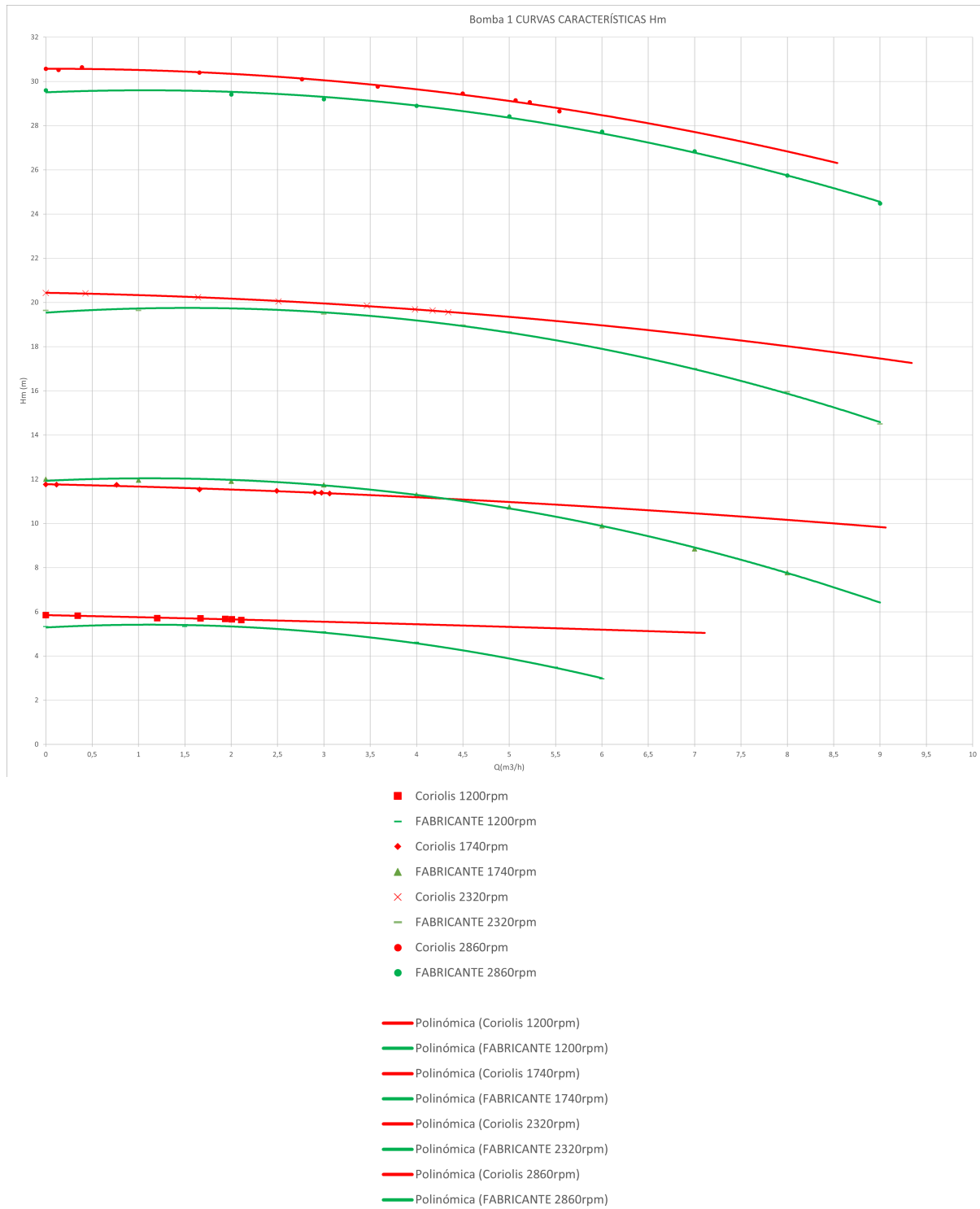


Figura 4.2: Comparación curvas bomba 1 a diferentes regímenes de giro con el fabricante. Fuente: E.P.

Revoluciones [Coriolis y fabricante]	Máximo error	Mínimo error
1200rpm	9,74 %	5,89 %
1740rpm	-4,71 %	-2,00 %
2320rpm	4,08 %	1,96 %
2860rpm	3,28 %	0,85 %

Tabla 4.18: Errores de los ensayos de la bomba frente a ensayos del fabricante.

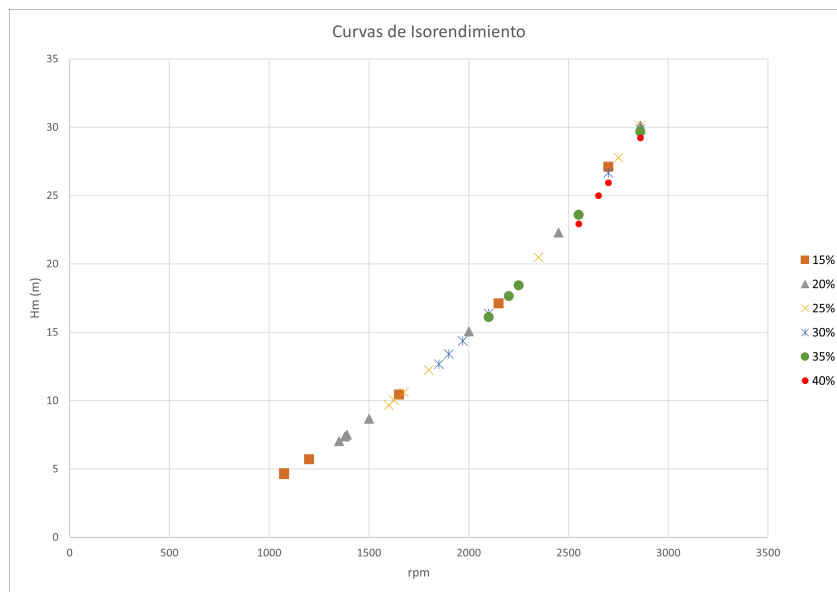


Figura 4.3: Ensayos para las curvas de isorendimiento. Fuente: E.P.

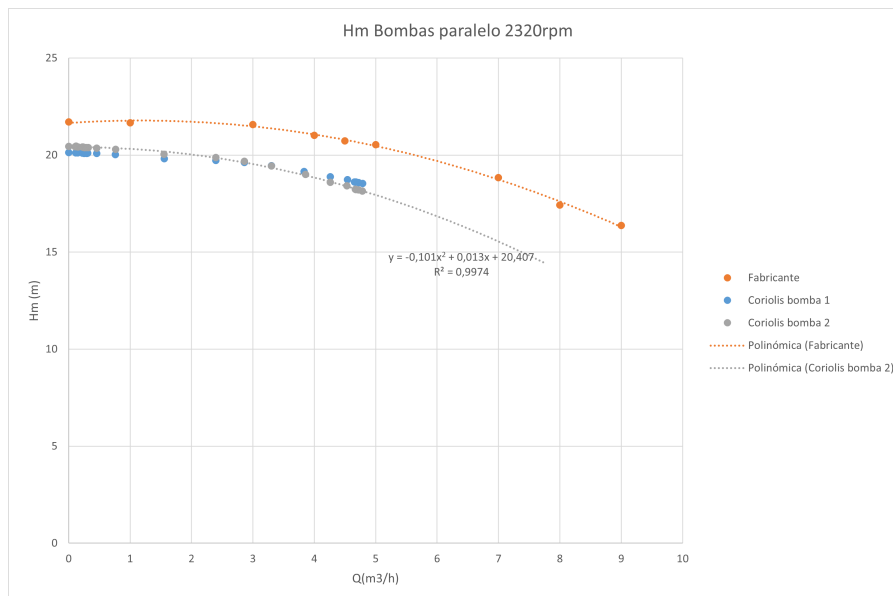


Figura 4.4: Bombas en paralelo frente a fabricante. Fuente: E.P.

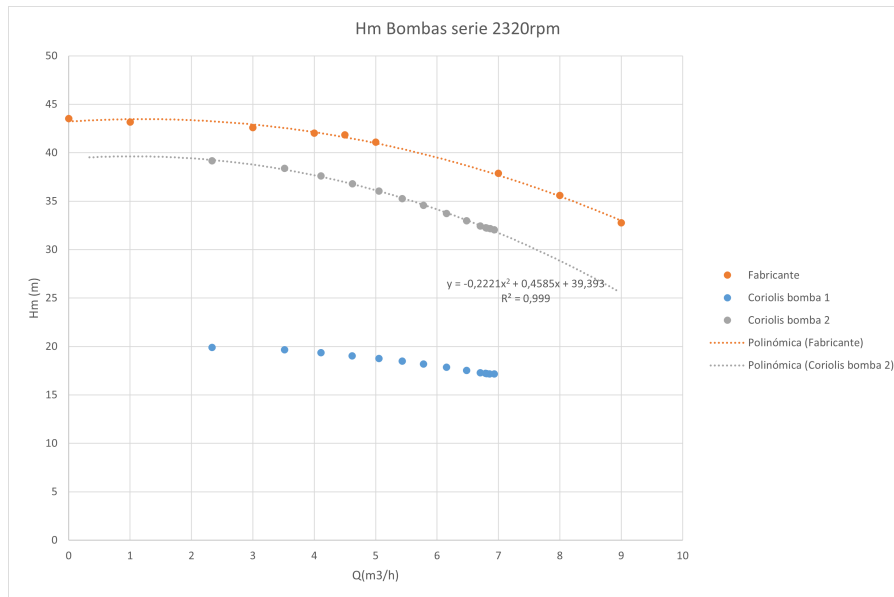


Figura 4.5: Bombas en serie frente a fabricante. Fuente: E.P.

También se muestra una comparación de las curvas obtenidas después del purgado de aire del banco frente al fabricante. En este caso, si se quisiera representar la aproximación polinómica de las curvas sería más exacta, pues se tiene un mayor rango de valores.

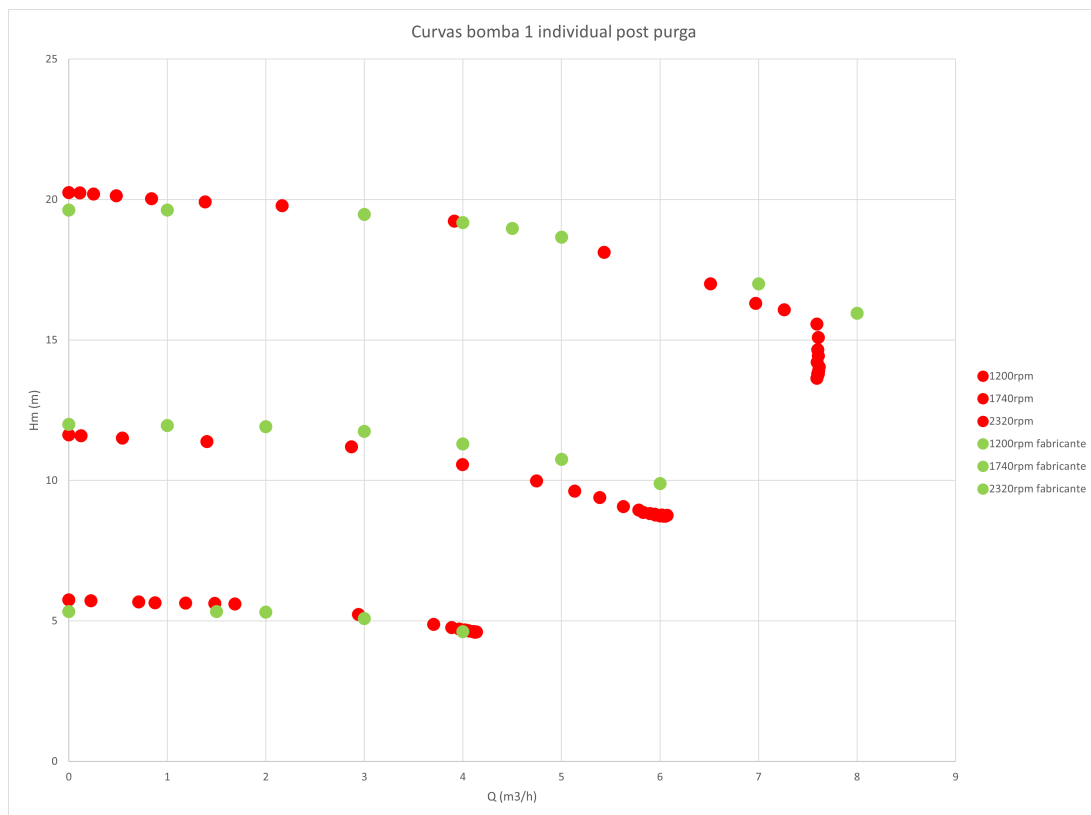


Figura 4.6: Comparación curvas bomba 1 a diferentes regímenes de giro con el fabricante, después de purgar de aire el sistema. Fuente: E.P.

Se puede ver que las curvas se corresponden totalmente con las esperadas dadas por el fabricante [4].

4.4. Interpretación de los datos

En este apartado se van a comentar, parte por parte, las conclusiones que se pueden obtener tras analizar los datos que se muestran en los apartados 4.2 y 4.3.

- **Comportamiento de los caudalímetros:** (Ver Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4). El valor obtenido del caudalímetro coriolis es considerado como correcto, pues se ha comparado con el caudal medido a través de la célula de carga, obteniendo el mismo valor. Es por ello que se va a razonar tomando éste como el patrón válido del sistema:
 - **Vórtex:** Este caudalímetro no es capaz de medir caudales inferiores a $2,1m^3/h$ [5]. Esto se ha podido comprobar experimentalmente. Se aprecia cómo, para los valores de la bomba 1 a $1200rpm$ el Vórtex no marca ningún valor coherente, siendo a veces mayor que el real, y otras cero. Sin embargo, para caudales superiores, es el que mejor comportamiento presenta, siendo aquel con más similitud al valor medido por el caudalímetro Coriolis.
 - **Ultrasonidos:** Es capaz de medir en todos los rangos de caudal, pero tiene un error de medida a la baja para cualquier caudal. En ocasiones, mide correctamente, pero no puede considerarse un caudalímetro robusto que deba emplearse en este banco de ensayo para la medida del caudal. En teoría, estos caudalímetros tienen unas pérdidas de carga despreciables, por lo que se deriva que sería necesario renovar este elemento del banco para poder utilizarse adecuadamente.
 - **Electromagnético:** Tiene un comportamiento muy similar al caudalímetro Coriolis. Funciona adecuadamente para todos los rangos de caudal, con un error despreciable debido quizá al intervalo de tiempo entre tomas de datos por la oscilación del agua generada por el bombeo de la misma. Se recomienda emplear este caudalímetro para la práctica de comparación de caudales de Máquinas Hidráulicas.
- **Comparación con el fabricante** (Ver Figura 4.2). Aunque se asemeja considerablemente a la curva proporcionada por el fabricante (Con errores bajos (4.18) y explicados por las pérdidas de carga debidas a los codos y la presencia de aire en las tuberías) la curva obtenida experimentalmente en el banco de ensayo muestra una altura manométrica superior a la del fabricante. Este comportamiento podrá solucionarse, como se explica en apartados posteriores. Cabe destacar la similitud alcanzada con la baja cantidad de datos de la que se dispone, pues la variación de caudal en este caso es muy leve, lo que impide generar una curva polinómica realmente representativa.
- **Curvas isorendimiento:** (Ver Figura 4.3). El comportamiento del banco de ensayo es el de una polinómica de grado 2, sin ningún valor atípico. Los valores de la estimación son ideales, por lo que se puede deducir que el comportamiento de la bomba durante el funcionamiento es el correcto.
- **Bombas en serie y paralelos:** (Ver Figuras 4.5 y 4.4). Al igual que el comportamiento individual, la curva se aproxima a la del fabricante, pero no llega a ser igual. Sin embargo, el comportamiento de las bombas es el esperado. Por ejemplo, en el caso de las bombas en serie, se puede ver como para un mismo caudal, la bomba 1 (que se encuentra antes en el circuito) tiene exactamente la mitad de altura manométrica que la bomba 2. Por otro lado, si se mira el esquema de bombas en paralelo se puede ver que, para un mismo caudal,

se obtiene la misma altura. Sin embargo, hay que destacar que el sistema mide un caudal total, por lo que el verdadero caudal que circula por cada una de las bombas en el caso de trabajo en paralelo es la mitad del que se marca en los datos obtenidos en el ensayo⁹.

- **Comportamiento del banco después del purgado de aire:** (Ver Figura 4.6). Tras la salida del aire que había dentro de las tuberías del sistema, se puede comprobar la mejora en el comportamiento del mismo. Ahora, se aprecia que las curvas, comparadas con el fabricante, son prácticamente idénticas. Esto es porque se ha evitado el mal funcionamiento de la bomba, por la cual circulaba una gran cantidad de burbujas de aire que limitaban su funcionamiento. Sin embargo, ahora las curvas (que tienen un mayor rango de valores) presentan unas características diferentes a las que se han estudiado antes, y es necesario comentarlas en detalle para poder comprender el comportamiento del banco de ensayo:
 - **Bomba a 1200rpm:** (Ver Tabla 4.15). Desde la apertura de la mariposa 100 % hasta 55 %, se mantiene constante el valor de caudal en el Coriolis. La razón de esto es que el caudal de agua no es suficiente como para verse afectado por el cerrado de la válvula, pues no llena por completo la tubería. Sin embargo, sí que se aprecia cómo, a partir de este valor, el caudal cae rápidamente con pequeñas variaciones en la apertura de la válvula.
 - **Bomba a 1740rpm:** (Ver Tabla 4.16). En este caso sucede, al igual que en el anterior, que el caudal de agua no es suficiente. Sin embargo, la variación puede verse antes.
 - **Bomba a 2320rpm:** (Ver Tabla 4.17). A este régimen de giro aparece un comportamiento indeseado en el banco de ensayo. La bomba es capaz de aportar más caudal del que se marca en la tabla, pero se produce el fenómeno de la cavitación. La cavitación impide que el caudal de agua sea mayor, y provoca ruido y desgaste en la bomba y la válvula de mariposa. No es hasta que el cerrado de la misma es suficientemente algo, que deja de oírse el ruido de las burbujas de aire impactando en los componentes del banco de ensayo. Es posible apreciar la cavitación también en la gráfica que se muestra en la Figura 4.6, donde es evidente la caída de altura manométrica cuando se intenta elevar el caudal que transita por la instalación. Se pierde altura al abrir más la válvula de mariposa.

No se han tomado los valores a 2860rpm por seguridad y mantener el buen trato del banco de ensayo. La cavitación en dicho caso era extrema, y el sonido de las burbujas impactando tanto en la bomba, como en la válvula de mariposa, generaba un estruendo que no vaticina nada bueno para los componentes del circuito.

4.5. Evaluación del funcionamiento del PID

Para poder comprobar que la programación del CFC especificado en la sección 4.5 es adecuado, se han realizado varias pruebas de comportamiento al PID.

Realizar pruebas para un controlador PID utilizando una función de rampa y luego una función de escalón es una práctica común en la ingeniería de control. Estas pruebas se realizan para verificar el rendimiento y la estabilidad del controlador antes de aplicar una perturbación significativa en el sistema.

La prueba de rampa implica aplicar una entrada gradualmente creciente o decreciente al sistema controlado. Esto permite observar cómo el controlador responde a cambios suaves en la señal de

⁹Por el diseño que tiene la toma de datos en el banco de ensayo, se muestran los valores obtenidos directamente de la pantalla de WinCC. No obstante, los resultados son coherentes, aunque su toma y graficación no es aquella a la que estamos acostumbrados. Sí que se asemeja al valor dado por el fabricante.

referencia. Al analizar la respuesta de salida del sistema, se pueden evaluar parámetros como el tiempo de respuesta, la precisión, la estabilidad y la capacidad de seguimiento de la referencia del controlador.

La prueba de escalón, por otro lado, implica aplicar una entrada repentina y constante al sistema. Esto permite evaluar cómo el controlador responde a cambios bruscos en la señal de referencia. Al observar la respuesta del sistema, se pueden analizar características como el tiempo de establecimiento, la sobreoscilación, el error en estado estacionario y la capacidad de rechazo a perturbaciones.

Estas pruebas son importantes para validar el desempeño del controlador PID y ajustar sus parámetros si es necesario. Proporcionan información sobre la respuesta del sistema en diferentes condiciones y ayudan a garantizar un control preciso y estable antes de aplicar una perturbación significativa al sistema real.

En primer lugar, se muestran las pruebas realizadas con la función de rampa. Los parámetros de ajuste en cada caso se especificarán durante su explicación. Cabe recordar que el objetivo es controlar el nivel de agua del depósito considerando los diferentes caudales proporcionados por la bomba como una perturbación y manipulando la válvula proporcional como acción de control. Sin tener en cuenta la dinámica de los actuadores este sistema clásico de control es un sistema de primer orden (un solo polo).

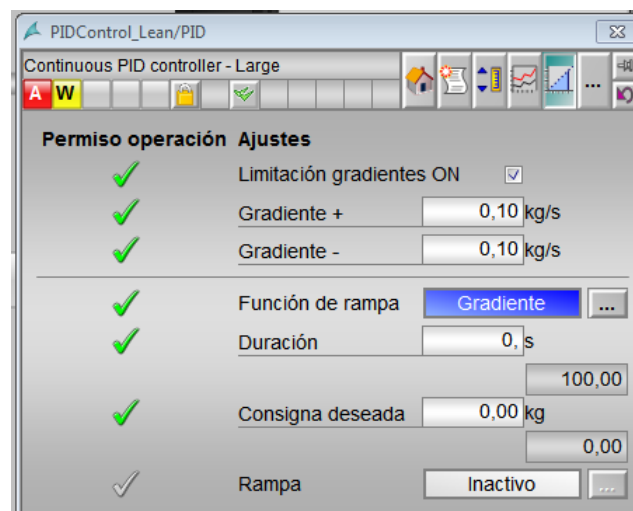


Figura 4.7: Gradientes de la pendiente en función rampa. Fuente: E.P.

Con esta perturbación, se estudian los siguientes casos:

- **Bomba a 1450 rpm, Ganancia 3, TI 60 s:** Las pruebas han comenzado desde este punto, con una velocidad media de la bomba, y con la ganancia y tiempo integral especificados.

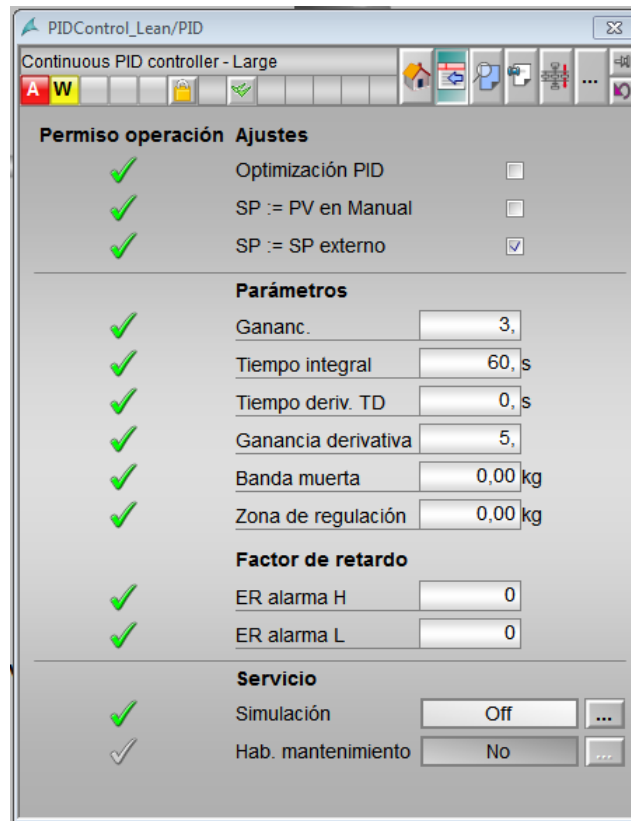


Figura 4.8: Parámetros primer ajuste. Fuente: E.P.

Con estos ajustes se han estudiado dos escenarios. Regular el peso en el depósito desde 2 kg hasta 6 kg, y desde esos 6 kg a 1 kg (representados en la Figura 4.9 y 4.10 respectivamente).

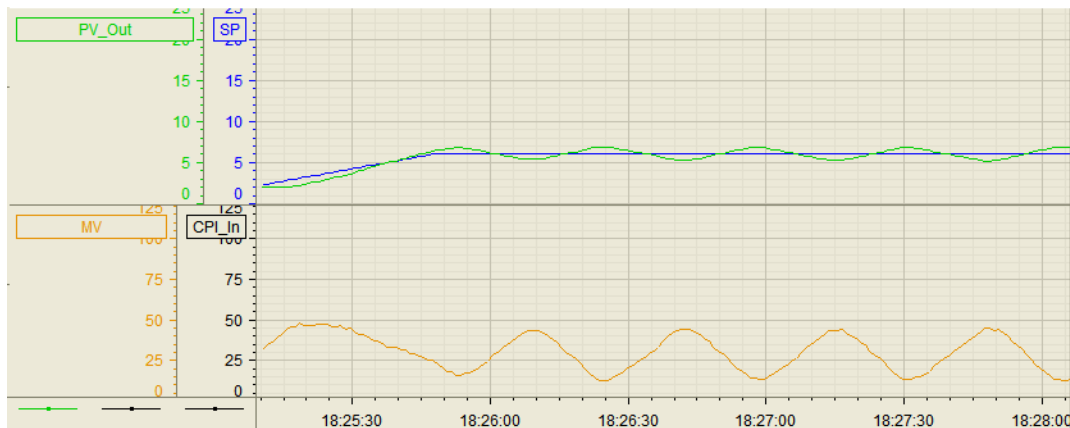


Figura 4.9: Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1450 rpm, Ganancia 3, TI 60 s. Paso de 2 kg a 6 kg en el depósito. Fuente: E.P.

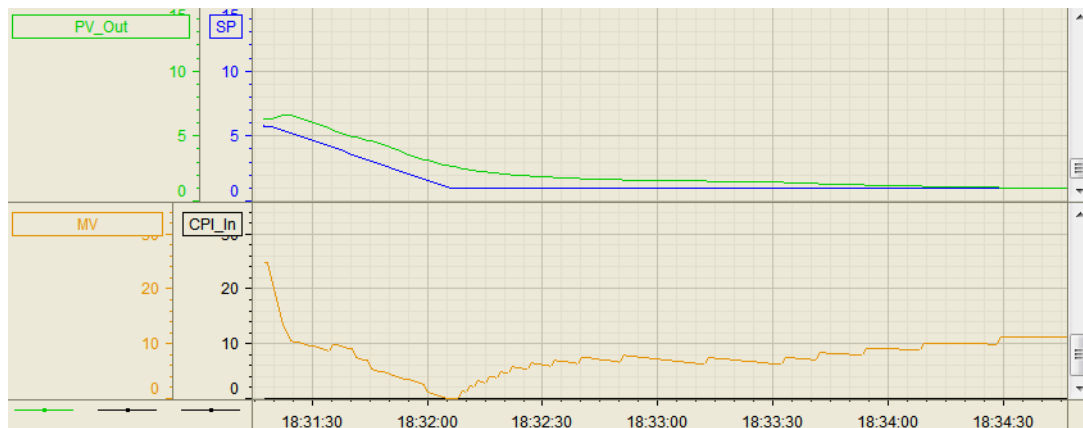


Figura 4.10: Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1450 1450 , Ganancia 3, TI 60 s. Paso de 6 kg a 1 kg en el depósito. Fuente: E.P.

Se presenta a continuación la leyenda de las dos gráficas anteriores, y será la misma para las próximas gráficas:

- **PV_Out:** Valor de proceso. Se corresponde con el peso medido por la célula de carga.
- **SP:** *Set Point*. Se marca un valor fijo al que debe llegar la PV.
- **MV:** Variable manipulada. En este caso, el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa.

Es posible apreciar como con estos ajustes, la variable del proceso no es capaz de situarse en el *Set Point* deseado. La variable manipulada cambia de manera relativamente constante, no ajustándose adecuadamente al error entre PV y SP. Este resultado es esperable, pues el sistema a controlar es de tipo 0 y un regulador PID no elimina el error de velocidad (error ante entrada en rampa).

- **Bomba a 1740 rpm, Ganancia 2, TI 100s:** A partir de las observaciones del caso anterior, se puede ver que el tiempo integral es demasiado bajo, pues no se ajustan PV y SP. Además, el elevado valor de ganancia genera cambios muy bruscos en la apertura de la válvula de mariposa, por lo que no permite reaccionar al PD a los cambios de nivel en el depósito y se producen oscilaciones.

Es por esto que se plantean unos nuevos parámetros de ajuste. Se van a comprobar para una mayor velocidad de giro de la bomba, 1740 rpm, pues es una forma de presionar aún más el funcionamiento del PID.

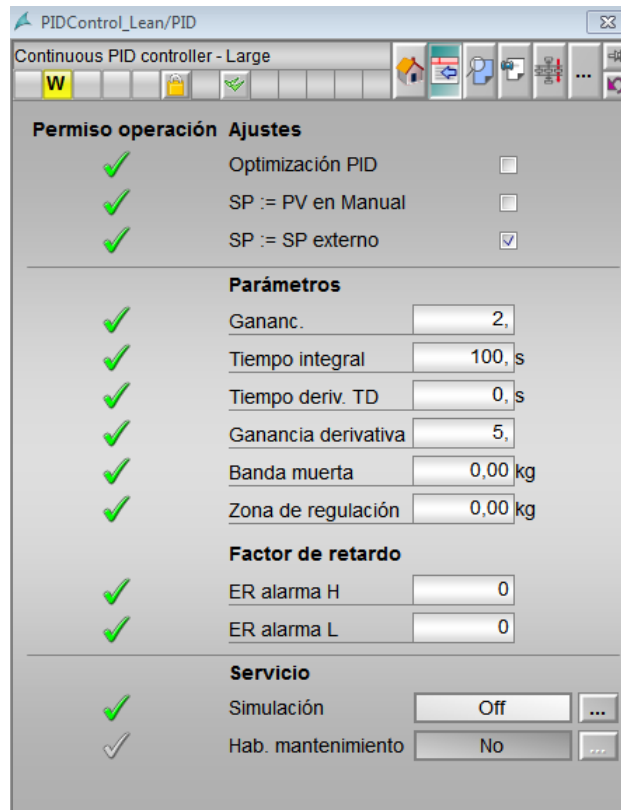


Figura 4.11: Parámetros segundo ajuste. *Fuente: E.P.*

En este caso, también se plantean dos escenarios. Sin embargo, se ha optado por variar los límites del ensayo. Se estudia de 2 kg a 7 kg, y viceversa, pues 1 kg era un peso demasiado bajo para obtener una respuesta suficientemente rápida (el depósito descarga lentamente para tan poco volumen de agua). Estos escenarios están representados en la Figura 4.12 y 4.13.

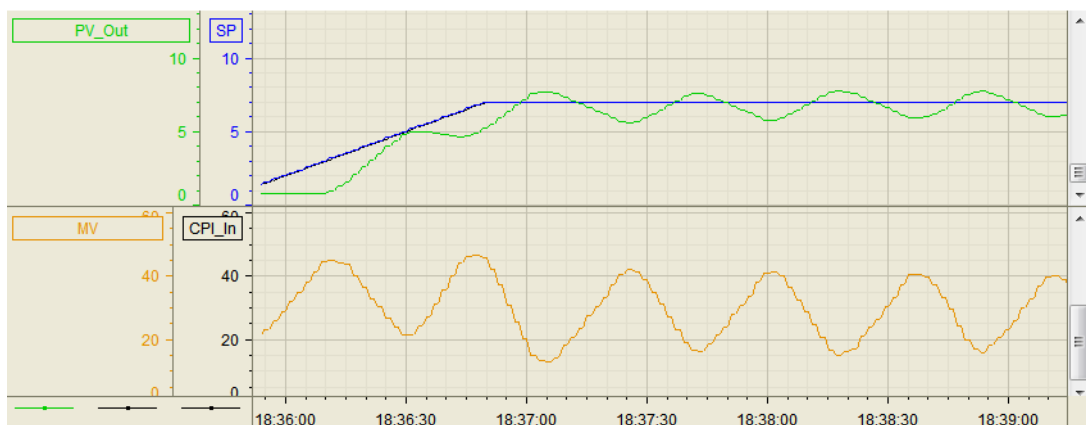


Figura 4.12: Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1740 rpm, Ganancia 2, TI 100 s. Paso de 2 kg a 7 kg en el depósito. *Fuente: E.P.*

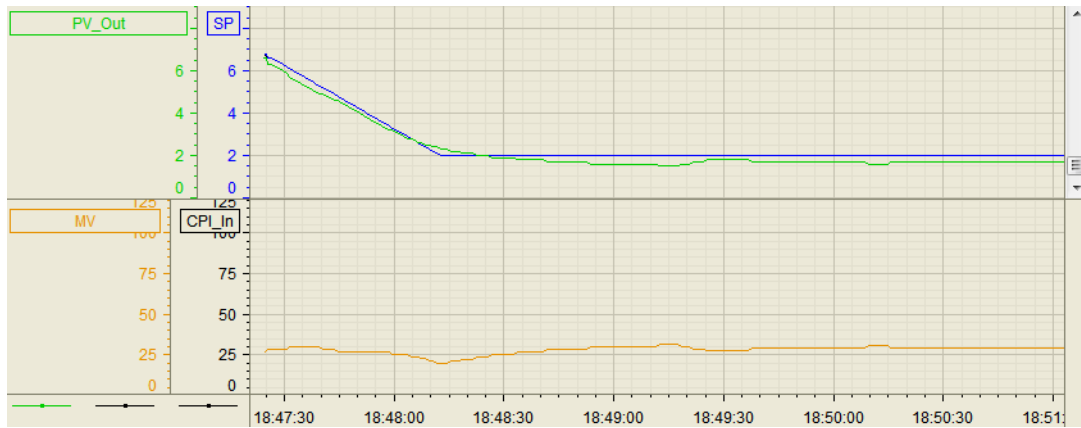


Figura 4.13: Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1740 rpm, Ganancia 2, TI 100 s. Paso de 7 kg a 2 kg en el depósito. Fuente: E.P.

El comportamiento no ha mejorado, y además, las diferencias entre PV y SP se ven acentuadas por la elevada velocidad de giro de la bomba.

- **Bomba a 1740 rpm, Ganancia 2, TI 600 s:** Para tratar de mejorar el comportamiento estacionario visto en la Figura 4.12, se incrementa a 10 minutos el valor del tiempo integral.

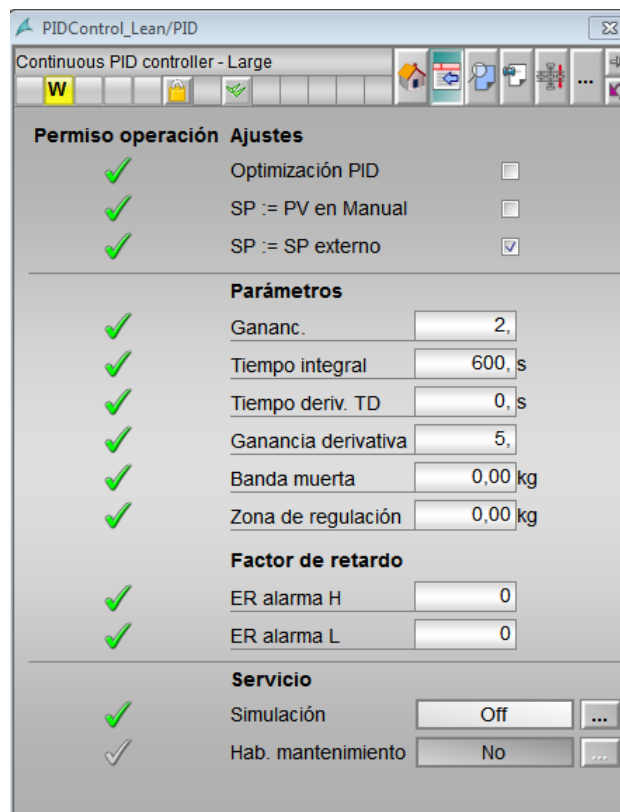


Figura 4.14: Parámetros tercer ajuste. Fuente: E.P.

El escenario planteado es el mismo que el de la Figura 4.12.

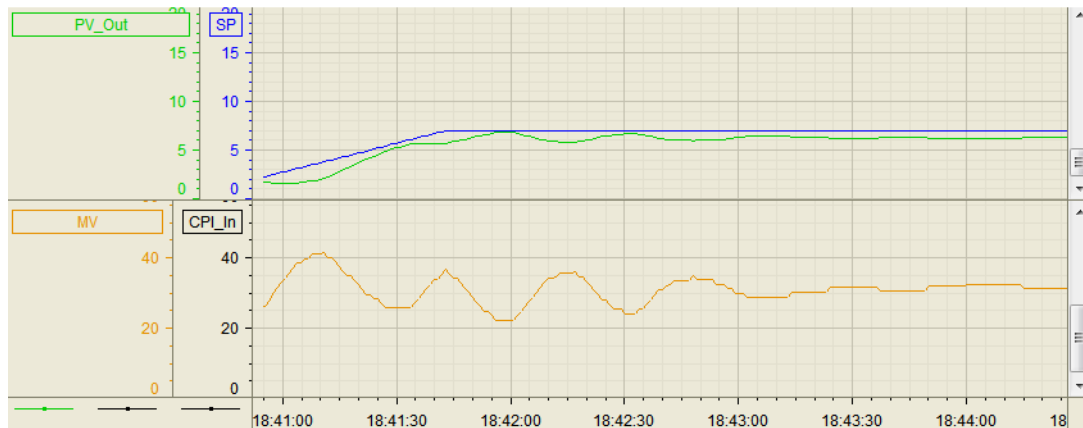


Figura 4.15: Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1740 rpm, Ganancia 2, TI 600 s. Paso de 2 kg a 7 kg en el depósito. Fuente: E.P.

La MV se estabiliza, pero la variación es tan sutil que no se llega a alcanzar el valor deseado exactamente (aunque sí es muy cercano). No obstante, es la mejor respuesta hasta ahora.

- Bomba a 1200 rpm, Ganancia 2.3, TI 240 s:** Se ha podido comprobar que un régimen de giro más elevado hace más complicado el control del PID. Es por ello que se opta por reducirlo a 1200 rpm. Para compensar este cambio, se aumenta levemente la ganancia. Además, para lograr que el PV se acerque más rápidamente al SP una vez se encuentre en zona cercana, se ha reducido el TI de 600 s a 240 s.

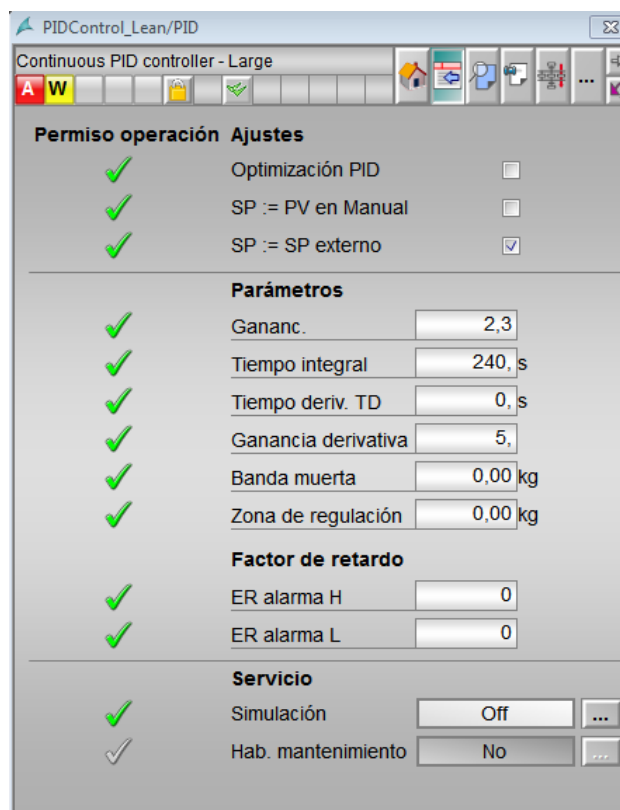


Figura 4.16: Parámetros cuarto ajuste. Fuente: E.P.

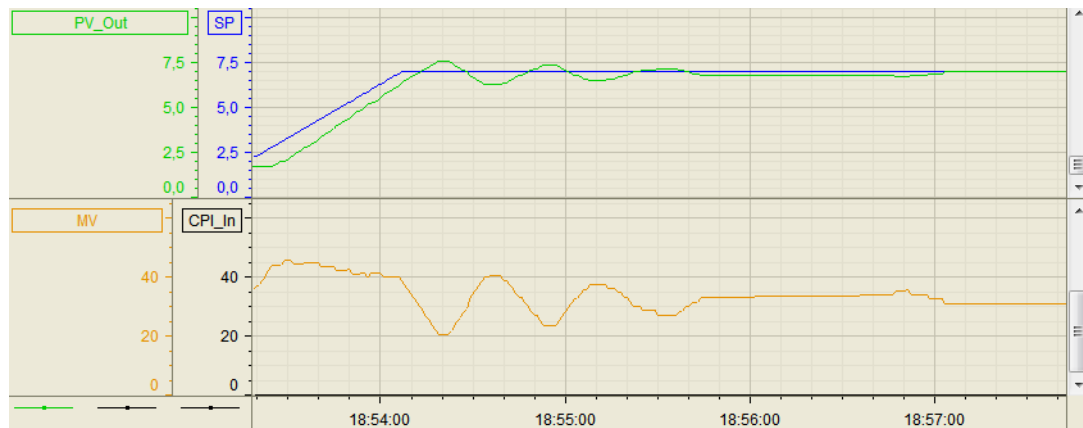


Figura 4.17: Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1200 rpm, Ganancia 2.3, TI 240 s. Paso de 2 kg a 7 kg en el depósito. Fuente: E.P.

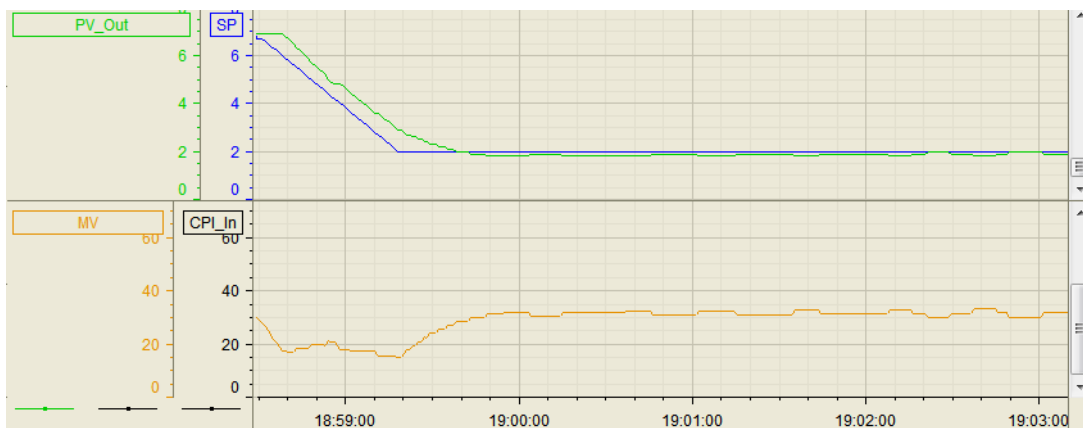


Figura 4.18: Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Rampa. Bomba 1200 rpm, Ganancia 2.3, TI 240 s. Paso de 7 kg a 2 kg en el depósito. Fuente: E.P.

Finalmente, con la combinación de un régimen de giro de la bomba adecuado, y con unos parámetros de ajuste efectivos, se ha logrado obtener el llenado de depósito deseado de manera exacta, segura, y en un tiempo no muy elevado.

Tras obtener los resultados finales (1200 rpm), se estudia la respuesta del sistema ante la entrada escalón, para saber cómo se comporta frente a bruscas perturbaciones. Se hace notar que en este caso, la acción integral debería eliminar el error de posición, a diferencia de lo esperado y observado con la entrada en rampa. La configuración de los parámetros es la mostrada en la Figura 4.16.

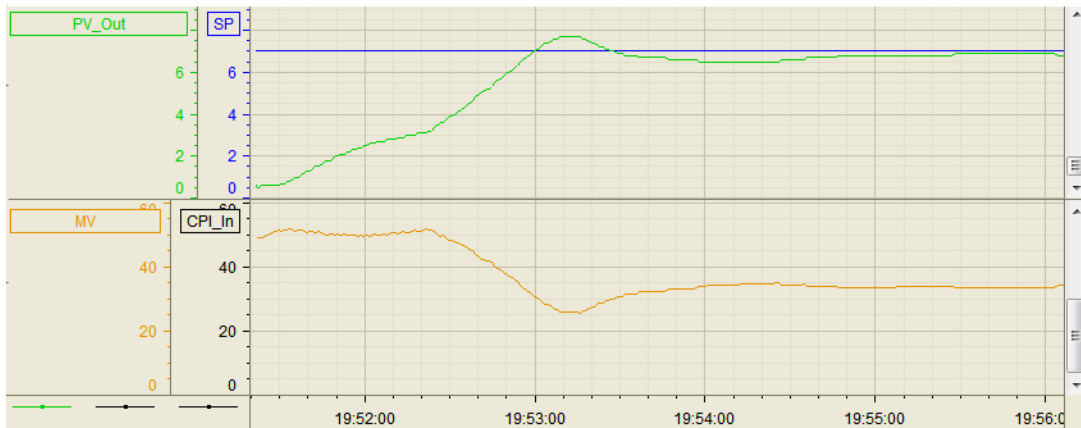


Figura 4.19: Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Escalón. Bomba 1200 rpm, Ganancia 2.3, TI 240 s. Paso de 2 kg a 7 kg en el depósito. Fuente: E.P.

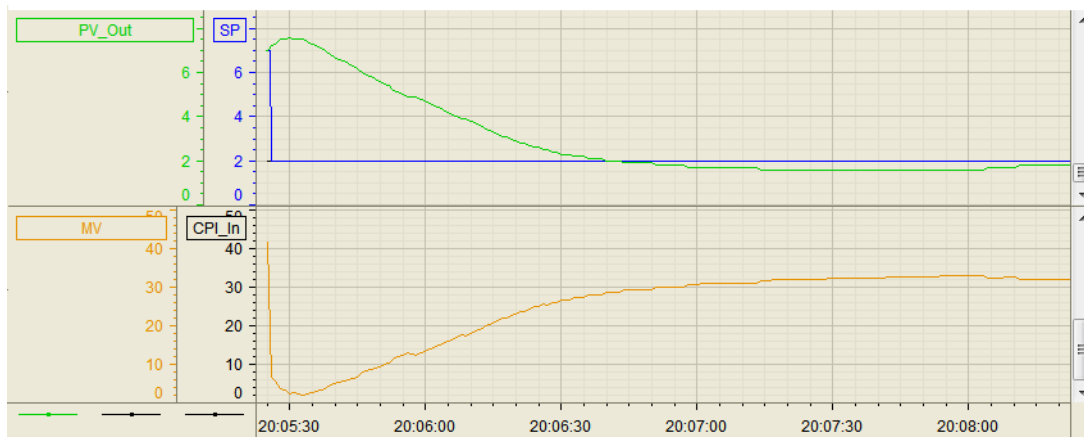


Figura 4.20: Evolución frente al tiempo de las variables del PID. Bomba 1200 rpm, Ganancia 2.3, TI 240 s. Escalón. Paso de 7 kg a 2 kg en el depósito. Fuente: E.P.

Se observa que, a pesar de ser un sistema de primer orden se obtienen (al igual que en el caso de entrada en rampa) oscilaciones de pequeño valor, producidas por dinámicas no modeladas de los elementos actuadores y sensores. La estabilización en aproximadamente 3 minutos, tanto para el aumento como para la reducción del volumen en el depósito, indica que el controlador está respondiendo de manera rápida y adecuada a los cambios en la señal de entrada.

Además, el controlador ha demostrado ser capaz de controlar las oscilaciones de manera satisfactoria. Esto significa que el controlador está ajustando correctamente los parámetros del sistema para mantener la salida del proceso lo más cercana posible a la referencia deseada, minimizando las oscilaciones y evitando una sobrecompensación o subcompensación significativa.

Estos resultados son indicativos de un buen ajuste del controlador PID y sugieren que el sistema está siendo controlado de manera eficiente y estable. Es importante destacar que los tiempos de estabilización y la capacidad de controlar las oscilaciones pueden variar dependiendo de la dinámica del sistema y los parámetros del controlador utilizados.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, este trabajo ha representado una oportunidad invaluable para adquirir un profundo conocimiento sobre la teoría y los componentes que conforman el banco de ensayo de Siemens, así como su fundamentación científica. A lo largo del desarrollo de este proyecto, se ha llevado a cabo un minucioso análisis de las condiciones iniciales del banco, lo que ha permitido comprender su situación actual y determinar las áreas que requerían mejoras y optimizaciones. Estas áreas se han abordado de manera detallada y se han plasmado en el apartado de líneas futuras de este trabajo.

Una de las tareas fundamentales ha sido la actualización del manual de funcionamiento del banco de ensayo, con el objetivo de hacerlo más accesible y comprensible para aquellos usuarios que no poseen experiencia previa en el manejo del software SIMATIC ni en el uso de autómatas. Esta labor ha sido esencial para garantizar que los futuros alumnos, o personas que utilicen el banco de ensayo puedan aprovechar al máximo sus funcionalidades, y obtener así resultados óptimos en sus investigaciones y prácticas.

Además, se ha llevado a cabo una minuciosa puesta a punto del banco, asegurando que todos sus elementos funcionen de manera coordinada y que los datos recopilados por los medidores de presión y caudalímetros puedan ser interpretados con precisión. Aunque se han identificado algunos problemas técnicos, como un transmisor de presión defectuoso y una célula de carga con ciertas limitaciones en su precisión, se ha logrado garantizar un funcionamiento general adecuado del sistema.

Otro logro ha sido la comparación de las curvas características de las bombas del banco de ensayo con las proporcionadas por el fabricante. Este análisis meticuloso ha permitido verificar la alta similitud entre ambas, lo que ha confirmado la exactitud y fiabilidad de los datos medidos. Esta validación es fundamental para asegurar la precisión de los resultados obtenidos a través del banco de ensayo. No obstante, se ha podido comprobar que se alcanza un caudal máximo debido a la limitación ocasionada por la geometría del caudalímetro Coriolis, dentro del cual se produce cavitación.

Este trabajo también puede emplearse como un pequeño manual uso de SIMATIC y de la tecnología relacionada con el banco de ensayo, con el objetivo de transmitir los conocimientos adquiridos a futuros alumnos que necesiten trabajar con los mismos medios. Esta iniciativa contribuirá a la formación de ingenieros altamente capacitados y preparados para enfrentar los desafíos de la industria y aprovechar al máximo las herramientas y tecnologías disponibles.

Finalmente, se ha logrado implementar lazos de control en el banco de ensayo, tanto en modo SFC de arranque como mediante un CFC de un PID que controla el peso del agua en el depósito en función de la apertura de una válvula mariposa, para una velocidad de giro de la bomba pre-seleccionada. Estos lazos de control son fundamentales para asegurar un funcionamiento eficiente y preciso del banco de ensayo, optimizando los procesos y maximizando los resultados obtenidos.

En conclusión, este trabajo ha cumplido satisfactoriamente con los objetivos propuestos, abordando de manera integral y rigurosa cada uno de los aspectos del banco de ensayo de Siemens. Se ha sentado una base sólida para futuros trabajos y mejoras, los cuales podrán ser continuados y completados por futuros estudiantes interesados en seguir ampliando el potencial y la relevancia de este proyecto.

6. LÍNEAS FUTURAS

En el momento de la entrega de este trabajo, el banco de ensayo queda totalmente funcional. Se puede emplear para la realización de prácticas en el laboratorio y presenta condiciones de operación seguras, que impiden roturas del sistema por parte de algún usuario que no esté experimentado en el banco. Además, se ha escrito un tutorial de arranque y preparación del banco de ensayo, para que cualquier persona que desee utilizarlo pueda llegar a la interfaz de WINCC, y trabajar en las pantallas de Máquinas Hidráulicas y Eólicas y Mecánica de Fluidos II.

No obstante, este banco puede seguir perfeccionando sus características. Se proponen a continuación posibles líneas de investigación, que permitan hacer nuevos trabajos relacionados con este equipo:

- **Transcripción tutorial SIEMENS:** Durante el desarrollo de este trabajo, se realizó un curso de funcionamiento de SIMATIC, así como de la teoría de comunicaciones relacionada con el banco. Este curso se encuentra grabado en vídeo, y se plantea como oportunidad útil para los siguientes trabajadores del banco de ensayo, la creación de un manual escrito, que contenga todos los contenidos explicados en dicho videotutorial.
- **Nuevos elementos de control:** Puesto que la parte mecánica del banco de ensayo está totalmente funcional, sería de interés asociar el equipo con otros departamentos de la universidad. Departamentos relacionados con la automatización, comunicaciones, o el control de sistemas, podrían aprovechar al máximo el potencial que tiene esta instalación.
- **Reestructuración de la interfaz:** Aunque la interfaz de WINCC funciona a la perfección, su estética y características podrían verse mejoradas. Es el caso de las gráficas de toma de datos de la segunda pantalla del mismo, para analizar la bomba. Sería de interés realizar una gráfica a tiempo real que mida continuamente los datos de la instalación. También, algunos componentes (en específico una válvula) se muestran siempre como cerrados aunque estén permitiendo el flujo a través de ella. Es por lo tanto interesante revisar bien esta interfaz, y los CFC y SFC, para dejar el entorno de trabajo destilado.
- **Cambio de la estructura de la bancada:** Debido a pérdidas de agua, los tableros de madera que sostienen los componentes del banco de ensayo se han degradado, dejando el estado del banco en peores condiciones. Cambiar estos paneles por otros impermeables, y reubicarlos de manera alineada, puede cambiar considerablemente la estética del banco de ensayo.
- **Conexión seta de parada de emergencia:** En el cuadro eléctrico se puede localizar una seta de parada de emergencia. Esta seta desconectaría el PLC y variadores de frecuencia, así como la alimentación de las electroválvulas. En caso de error no contemplado en software, podría detenerse el funcionamiento del banco de ensayo de manera rápida. Sin embargo, esta no está conectada al sistema eléctrico y pulsarla no ocasionará ninguna parada. Se propone conectar este sistema y dejarlo funcional para trabajos futuros.
- **Cambio de la célula de carga:** El sistema de pesaje del banco de ensayo que envía la información al ordenador no marca un valor de peso real. Se ha comprobado el peso de agua de manera experimental, midiendo la altura de agua en el depósito y midiendo la superficie de su base (obteniendo así el volumen). No coincide con el que se muestra por pantalla, aunque el caudal sí coincide con el que mide el Coriolis. Es por ello que se ha considerado

como defectuosa la célula de carga, y sería necesario pedir una nueva a instrumentación de SIEMENS.

- **Mayor automatización:** Los lazos de control creados son sencillos. El sistema tiene la capacidad de trabajar con implementaciones de mayor complejidad.

Por supuesto, hay mucho trabajo por delante que puede que no haya quedado contemplado en esta sección. El lector es libre de ampliar su conocimiento, y las capacidades del banco de ensayo con libertad.

<i>Componente</i>	<i>Unidades</i>	<i>Precio unidad</i>	<i>Total</i>
Adaptador de bus 2xRJ45 V8.2	1	64 €	64 €
SCALANCE X200-4P IRT	1	1272 €	1272 €
IE/PB Link PN IO	1	1335 €	1335 €
SITOP PSU100S	1	144 €	144 €
AFD de 8	1	458 €	458 €
Acoplador PROFIBUS DP/PA	1	439 €	439 €
Bus del PA link y la fuente	1	55 €	55 €
Fuente de alimentación	1	53 €	53 €
Cable profinet	20 m	0.8 €/m	16 €
Cabezal profinet	10	6.8 €	68 €
PB FC STANDARD CABLE BUS	20 m	0.7 €/m	14 €
Conector hembra Profibus DP	2	63.5 €	127 €
Profibus negro	20 m	2.65 €/m	53 €
Profibus azul	20 m	1.35 €/m	27 €
Pila PLC	1	18.85 €	18.85 €
ET200SP 155-6 PN HF	1	227.15 €	227.15 €
Coriolis	1	3475 €	3475 €
Electromagnético	1	782 €	782 €
Vórtex	1	1511 €	1511 €
Ultrasónico	1	1611 €	1611 €
Transmisor presión 250 mbar	1	461 €	461 €
Transmisor presión 5 bar	2	461 €	922 €
Transmisor presión 30 bar	1	529 €	529 €
Célula carga	1	160 €	160 €
Tarjeta Pesaje	1	470 €	470 €
Conector	1	23 €	23 €
Transinsor nivel	1	516 €	516 €
Posicionador neumático	1	485 €	485 €
Accesorio 1	1	26 €	26 €
Accesorio 2	1	12 €	12 €
Unidad de Control	2	410 €	820 €
Unidad de Potencia	2	405 €	810 €
Panel de Control	2	237 €	474 €
Kit conexiones	2	55.5€	111 €

Tabla 7.1: Presupuesto del proyecto. Materiales y componentes.

Concepto	Horas	Precio por hora	Total
Tutor académico 1	40	80 €	3200 €
Tutor académico 2	40	80 €	3200 €
Tutor Siemens	15	40 €	600 €
Laboral UDMF	50	20 €	1000 €
Curso formación	6	150 €	900 €
Beca colaboración	360	5 €	1800 €
Trabajo fuera de beca	360	- €	- €

Tabla 7.2: Presupuesto del proyecto. Recursos humanos.

El coste de los componentes y materiales es de 32487 euros y el coste de los recursos humanos de 10700 euros. También es importante tener en cuenta los costes indirectos de los recursos humanos, que se estiman en 2000 euros. El coste total del proyecto es por lo tanto de **45187 euros**.

También se presenta una tabla de amortizaciones del presupuesto, considerando que el proyecto ha tenido una duración de 6 meses.

<i>Componente</i>	<i>Amortización mensual</i>	<i>Falta por amortizar</i>
PC, Compresor y depósitos	8.33 €/mes	750 €
Válvulas todo/nada	3.50 €/mes	610 €
Válvula mariposa	2.50 €/mes	47 €
Bombas centrífugas	10.00 €/mes	401 €
SIMATIC PCS7 3er License	50.00 €/mes	2853 €
SIMATIC PCS7 BCE V8.1	20.00 €/mes	694 €
SIMATIC PDM V8.2	30.00 €/mes	1311 €
SIMATIC PCS7 V8.0 AS	60.00 €/mes	4257 €
DRIVE ES PCS 7 APL V8.1	25.00 €/mes	950 €
Perfil soporte	1.00 €/mes	6 €
CM PtP	10.00 €/mes	86 €
Tipo BU A0	2.00 €/mes	9 €
DQ 16x24VDC/0,5A ST	3.00 €/mes	20 €
AI 4xI 2/4 hilos ST	10.00 €/mes	100 €
AI 4xI 2-wire 4-20mA HART	20.00 €/mes	320 €
Adaptador de bus 2xRJ45 V8.2	3.00 €/mes	46 €
SCALANCE X200-4P IRT	40.00 €/mes	872 €
IE/PB Link PN IO	50.00 €/mes	835 €
SITOP PSU100S	10.00 €/mes	84 €
AFD de 8	20.00 €/mes	338 €
Acoplador PROFIBUS DP/PA	25.00 €/mes	314 €
Bus del PA link y la fuente	2.00 €/mes	43 €
Fuente de alimentación	2.00 €/mes	41 €
Cable profinet	1.00 €/mes	10 €
Cabezal profinet	2.00 €/mes	30 €
PB FC STANDARD CABLE BUS	1.00 €/mes	8 €
Conector hembra Profibus DP	5.00 €/mes	87 €
Profibus negro	2.00 €/mes	37 €
Profibus azul	1.00 €/mes	21 €
Pila PLC	0.50 €/mes	9 €
ET200SP 155-6 PN HF	10.00 €/mes	167 €
Coriolis	40.00 €/mes	2315 €
Electromagnético	15.00 €/mes	607 €
Vórtex	25.00 €/mes	961 €
Ultrasónico	25.00 €/mes	1011 €
Transmisor presión 250 mbar	10.00 €/mes	401 €
Transmisor presión 5 bar	20.00 €/mes	802 €
Transmisor presión 30 bar	20.00 €/mes	1011 €
Célula carga	5.00 €/mes	100 €
Tarjeta Pesaje	15.00 €/mes	260 €
Conector	2.00 €/mes	11 €
Transmisor nivel	15.00 €/mes	306 €

7. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

<i>Componente</i>	<i>Amortización mensual</i>	<i>Falta por amortizar</i>
Posicionador neumático	15.00 €/mes	310 €
Accesorio 1	1.00 €/mes	6 €
Accesorio 2	1.00 €/mes	6 €
Unidad de Control	20.00 €/mes	490 €
Unidad de Potencia	20.00 €/mes	470 €
Panel de Control	10.00 €/mes	354 €
Kit conexiones	2.00 €/mes	43 €

8. EVALUACIÓN DE IMPACTOS

8.1. Impacto social

El proyecto de diseño y puesta a punto del banco de ensayos de fluidos tiene varios impactos sociales importantes. El primero y más claro de ellos es la mejora de la educación de futuros alumnos. El banco de ensayo automatizado y actualizado proporciona a los estudiantes una herramienta de aprendizaje práctica y moderna. Permite comprender mejor los principios de la mecánica de fluidos y de la automatización en la industria, mientras adquieren habilidades prácticas relevantes para su futura carrera como ingenieros. Se mejorará por tanto la calidad de la educación al preparar a los estudiantes de manera más efectiva para los desafíos del campo laboral. Esto enlaza directamente con otro impacto social, como es la conexión directa con la industria (Siemens). Al emplear tecnología de última generación en colaboración con Siemens, el proyecto establece una conexión directa Universidad - Industria, dando a los alumnos la oportunidad de trabajar con un sistema de control real que se utiliza en diversas empresas. Esto permite la familiarización con herramientas y tecnologías reales, mejorando así la empleabilidad futura de éstos.

Este trabajo también impulsa la colaboración interdisciplinaria entre el departamento de Ingeniería Energética, el Centro de Automática y Robótica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y la empresa Siemens. Esto fomenta compartir el conocimiento entre diferentes áreas y disciplinas, lo que puede dar lugar a ideas innovadoras y soluciones más completas. Además, la colaboración con la industria ayuda a mantener actualizados los contenidos y enfoques de las asignaturas relacionadas con este banco de prácticas.

Otro punto a destacar es la transferencia de conocimiento para futuros Trabajos Fin de Máster debidos al desarrollo y grabación del curso y manual de uso de SIMATIC, con el que se transmite el conocimiento y las habilidades necesarias para trabajar con el banco de ensayo a próximos alumnos. Esto facilitará la continuidad dentro de la universidad, asegurando que el banco de ensayo no quede en el olvido.

8.2. Impacto económico

Los impactos sociales previamente mencionados presentan un impacto económico en segundo plano al formar de una mejor manera a los alumnos de la universidad. Se indican a continuación algunas características que influyen directamente en el desarrollo económico:

- Los graduados con experiencia en el manejo de equipos Siemens y la automatización de procesos tienen una ventaja competitiva en la búsqueda de empleo en sectores relacionados, lo que puede tener un impacto económico positivo tanto para los individuos como para las empresas que los contratan.
- Las colaboraciones con la empresa pueden tener beneficios económicos en términos de financiamiento, investigación conjunta, transferencia de tecnología y desarrollo de soluciones innovadoras.
- El optimizar los procesos de prueba puede suponer ahorros significativos en los costos operativos para las empresas que utilizan tecnologías similares en sus procesos industriales.
- La implementación exitosa del proyecto y la disponibilidad de un banco de ensayos automatizado y moderno mejoran la reputación y el prestigio de la universidad. Esto puede

atraer a más estudiantes interesados en carreras relacionadas con la ingeniería energética y aumentar la demanda de programas académicos ofrecidos por la institución

8.3. Impacto medioambiental

Algunos de los impactos medioambientales que puede tener este proyecto se enumeran a continuación:

- Al optimizar el funcionamiento del banco de ensayos, se minimiza el desperdicio de energía y se maximiza la utilización de los recursos disponibles.
- Al mejorar la precisión de las mediciones y el control de los parámetros, se evita el uso excesivo de recursos y se reduce el impacto ambiental asociado.
- La documentación y los protocolos utilizados en el proyecto y la propuesta de lazos de control equivalentes a una planta de procesos, pueden servir como referencia y guía para la implementación de sistemas similares en otros entornos industriales. Esto fomenta la adopción de buenas prácticas en términos de eficiencia energética, conservación de recursos y reducción de impactos ambientales.
- La incorporación de elementos relacionados con la eficiencia energética y el desarrollo sostenible en el diseño y operación del banco de ensayos, permite sensibilizar a los estudiantes y futuros ingenieros sobre la importancia de considerar el impacto ambiental en sus proyectos y decisiones profesionales.

Es importante destacar que, si bien el proyecto puede tener impactos medioambientales positivos, también es necesario considerar aspectos como el consumo de energía asociado a la operación del banco de ensayos y el manejo adecuado de los residuos generados durante las pruebas. Es fundamental implementar prácticas de gestión ambiental adecuadas y promover la conciencia ambiental en todas las etapas del proyecto, desde el diseño hasta la operación y mantenimiento continuo del banco de ensayos.

9. ASPECTOS LEGALES Y ÉTICOS

El desarrollo de cualquier proyecto, incluido el que se está presentando en este informe sobre el diseño y puesta a punto de un banco de ensayos de el laboratorio de mecánica de fluidos, implica considerar y cumplir con una serie de aspectos legales y éticos. Es necesario cumplir con las leyes laborales vigentes para garantizar los derechos de los trabajadores involucrados en el proyecto, como la contratación adecuada, la seguridad en el trabajo y el cumplimiento de los estándares de salud ocupacional. En el caso personal del autor del presente trabajo, se ha debido cumplir con las horas establecidas por el contrato de la Beca de Colaboración con el departamento.

Si el proyecto incluye desarrollos o innovaciones tecnológicas, es importante proteger la propiedad intelectual mediante patentes, derechos de autor u otros mecanismos legales para asegurar la exclusividad y los derechos de uso de los resultados del proyecto. En este caso, se ha estado sujeto a las licencias y productos proporcionados y adquiridos de Siemens.

También han de cumplirse las leyes y regulaciones ambientales aplicables para garantizar el manejo adecuado de residuos, la conservación de recursos naturales y la protección del medio ambiente durante todas las etapas del proyecto, así como con las regulaciones y estándares técnicos relevantes, las normas de seguridad eléctrica, calidad de los equipos utilizados, certificaciones de los componentes, entre otros.

Por otro lado se plantean algunas cuestiones éticas. Se ha de mantener la integridad científica y ética en todas las actividades relacionadas con el proyecto, como la recopilación y análisis de datos, la interpretación de resultados y la presentación de informes. Se debe evitar cualquier manipulación o distorsión de los datos y resultados obtenidos. Todas las personas presentes en el proyecto han dado su consentimiento informado, y se ha respetado su privacidad y la confidencialidad de los temas relacionados con el banco de ensayo. Tanto el manual de funcionamiento como el curso de Siemens son propiedad de la Universidad Politécnica de Madrid, que sustenta los contenidos de este informe.

Es importante ser transparente en la comunicación de los resultados del proyecto y divulgar la información relevante de manera clara y comprensible para todas las partes interesadas. La honestidad y la transparencia son valores fundamentales en la investigación científica y en el desarrollo de proyectos. Estos aspectos legales y éticos son fundamentales para garantizar la integridad, calidad y fiabilidad del proyecto, así como para proteger los derechos de las personas involucradas y cumplir con las regulaciones y normas establecidas.

10. ALINEACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un conjunto de metas establecidas por las Naciones Unidas para abordar desafíos globales y promover un desarrollo sostenible en todo el mundo. Los ODS abarcan una amplia gama de temas, incluyendo la erradicación de la pobreza, la igualdad de género, la educación de calidad, la acción por el clima, la paz y la justicia, entre otros. En el caso de este trabajo, se pueden identificar los siguientes ODS como directamente relacionados con el mismo:

- **Educación de calidad (ODS 4):** Este trabajo contribuye a mejorar la calidad y la accesibilidad de la educación, promueve la formación en habilidades relevantes para la industria y busca proporcionar oportunidades de aprendizaje práctico a los estudiantes.
- **Energía asequible y no contaminante (ODS 7):** El proyecto se centra en el diseño y puesta a punto de un banco de ensayos de fluidos que utiliza tecnología eficiente y automatizada para el estudio de bombas y el flujo de agua. Esto contribuye a promover el acceso a una energía asequible y más limpia.
- **Trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8):** Al mejorar la eficiencia y la calidad de los procesos industriales relacionados con las bombas y el flujo de agua, el proyecto puede impulsar el crecimiento económico y crear oportunidades de empleo en la industria.
- **Industria, innovación e infraestructura (ODS 9):** El proyecto se enmarca dentro del campo de la ingeniería energética y utiliza tecnología de automatización y control para mejorar el funcionamiento del banco de ensayos. Esto contribuye a promover la innovación y el desarrollo de infraestructuras sostenibles.
- **Acción por el clima (ODS 13):** Al mejorar la eficiencia energética y optimizar los procesos relacionados con las bombas y el flujo de agua, el proyecto puede contribuir a reducir el consumo energético y mitigar el impacto ambiental.
- **Alianzas para lograr los objetivos (ODS 17):** El proyecto implica la colaboración entre la Universidad Politécnica de Madrid y Siemens, lo que demuestra la importancia de las alianzas y la cooperación entre diferentes actores para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible.

Si bien estos son los ODS directamente relacionados con el trabajo descrito, es importante destacar que muchos otros ODS también pueden estar indirectamente relacionados, ya que la sostenibilidad y los desafíos globales están interconectados.

REFERENCIAS

- [1] Deloitte. *¿Qué es la Industria 4.0?* URL: <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/manufacturing/articles/que-es-la-industria-4.0.html> (visitado 13 de abr. de 2023).
- [2] Alberto Alonso Martín. *Industria 4.0 – Diseño, construcción, programación y puesta en marcha de un banco de prácticas en la Unidad Docente de Mecánica de Fluidos*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2017.
- [3] Olga Weis. *Guía de la comunicación RS485*. 2021. URL: <https://www.eltima.com/es/article/rs485-communication-guide/> (visitado 13 de mayo de 2023).
- [4] Grundfos. *Curvas de fabricante de las bombas*. URL: <https://product-selection.grundfos.com/products/cm-cme/cm/cm-10-2-96806945?tab=variant-curves&pumpsystemid=2080175360> (visitado 16 de abr. de 2023).
- [5] Ignacio Pérez Serrano. *PUESTA EN MARCHA, ENSAYOS Y DOCUMENTACIÓN DE UN BANCO DE CALIBRACIÓN DE CAUDALIMETROS PARA LA FUTURA INDUSTRIA 4.0*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2019.
- [6] David Martínez de la Cruz. *Automatización de Banco de Prácticas Como Módulo de Ensayo de Industria 4.0*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2018.
- [7] Siemens. *Sistema de control de procesos PCS 7 CPU 410-5H Process Automation*. 2014. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/822/74736822/att_82025/v1/S7_400_h_es_es-ES.pdf.
- [8] Siemens. *Manual de listas SINAMICS G120 Control Units CU230P-2*. 2018. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/195/109757195/att%5C_949019/v1/G120%5C_CU230P-2%5C_List%5C_Manual%5C_0418%5C_es-ES.pdf.
- [9] Siemens. *Manual de usuario SINAMICS G120 Control Units CU230P-2*. 2011. URL: <https://www.manualslib.es/products/Siemens-Sinamics-G120-Cu230P-2-944814.html>.
- [10] Grzegorz L Pankanin. «The vortex flowmeter: various methods of investigating phenomena». En: *Measurement Science and Technology* 16.3 (ene. de 2005), R1. DOI: 10.1088/0957-0233/16/3/R01. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/16/3/R01>.
- [11] Emerson ES. *Caudalímetros vórtex*. URL: <https://www.emerson.com/es-es/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/about-vortex> (visitado 19 de abr. de 2023).
- [12] Emerson ES. *Caudalímetros electromagnéticos*. URL: <https://www.emerson.com/es-es/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/about-magnetic> (visitado 29 de abr. de 2023).
- [13] EN da C Andrade. «Doppler and the Doppler effect». En: (1959).

- [14] Jorge Ramírez-Beltrán y Yeliena Silva. *Fundamentos de la medición de presión, nivel y caudal en los sistemas hidráulicos*. Ene. de 2011. ISBN: 978-959-261-362-1.
- [15] Emerson ES. *Caudalímetros Coriolis Micro Motion*. URL: <https://www.emerson.com/es-es/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/coriolis-flow-meters> (visitado 30 de abr. de 2023).
- [16] Inst Tools. *Coriolis Mass Flow Meter Working Principle*. 2016. URL: <https://instrumentationtools.com/coriolis-mass-flow-meter-working-principle/> (visitado 30 de abr. de 2023).
- [17] Anders Persson. «The Coriolis Effect». En: *History of Meteorology 2* (2005), págs. 1-24.
- [18] Full Mecánica. *Medidor de velocidad de uso aeronáutico*. 2014. URL: <http://www.fullmecanica.com/20-t?sectionid=1&task=edit&cid%5C%5B0%5C%5D=147&start=52> (visitado 30 de abr. de 2023).
- [19] Ingeniería Química Reviews. *Placa de orificio: ¿Qué es y cómo funciona?* 2020. URL: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/08/placa-de-orificio-como-funciona.html> (visitado 30 de abr. de 2023).
- [20] Alejandro Rafael García Ibarra, Arturo Hernández González, Jorge Ramírez Beltrán, Rodrigo Reina Muñoz y Edgar Charry Rodriguez. «Transmisor de presión diferencial de muy alta precisión y estabilidad». es. En: *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* 35 (abr. de 2014), págs. 57-77. ISSN: 1815-5928. URL: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282014000100006&nrm=iso.
- [21] Siemens. *Transmisor de presión SITRANS P DS III/P410 con HART*. 2005. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/485/109477485/att_849208/v1/A5E00053220-10es_DS3_HART_Ex_OI_es-ES.pdf.
- [22] Siemens. *Manual de instrucciones LC 300*. 2015. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/801/18186801/att_31634/v1/7ML19985HE21.2.pdf.
- [23] DASTEC. Soluciones de medición y control. *Sitrans LC 300 Siemens | Transmisor de nivel capacitivo con tecnología Inverse Frequency Shift*. 2020. URL: <https://www.dastecsrl.com.ar/productos/nivel/nivel-continuo/capacitivos-1/sitrans-lc-300-siemens-transmisor-de-nivel-capacitivo-con-tecnologia-inverse-frequency-shift> (visitado 30 de abr. de 2023).
- [24] Siemens. *SIWAREX WL260 SP-S AB Célula de carga*. 2023. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/195/109765195/att_1134255/v1/WL260_SP-S_AB_wt10_es.pdf (visitado 30 de abr. de 2023).
- [25] Siemens. *Módulo electrónico de pesaje SIWAREX WP321*. 2014. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/240/90893240/att_51275/v1/A5E34902760A-01_SIWAREX_WP321_GHB_es-es-ES.pdf (visitado 30 de abr. de 2023).
- [26] Direct Industry. *Módulo de pesaje electrónico SIWAREX WP321*. URL: <https://www.directindustry.es/prod/siemens-process-instrumentation/product-18343-1549987.html> (visitado 30 de abr. de 2023).

ANEXOS

A. Curvas del fabricante y gráficas secundarias

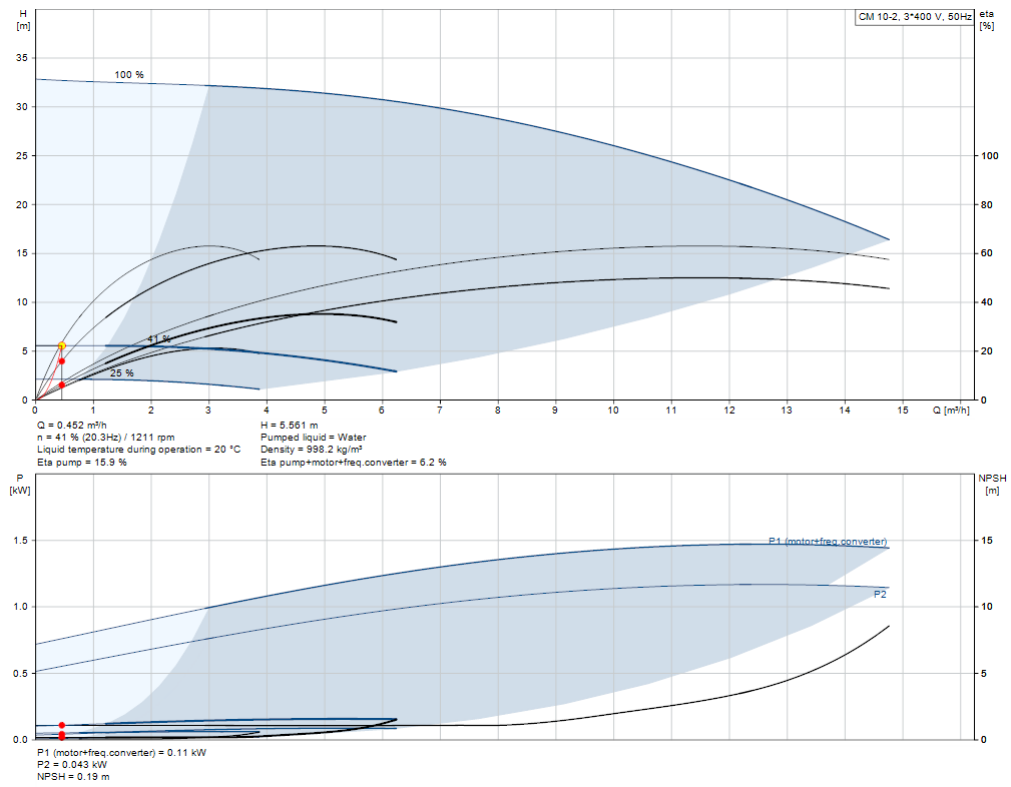


Figura A.1: Gráfica fabricante a 1200rpm. Altura y rendimiento. Fuente: [4]

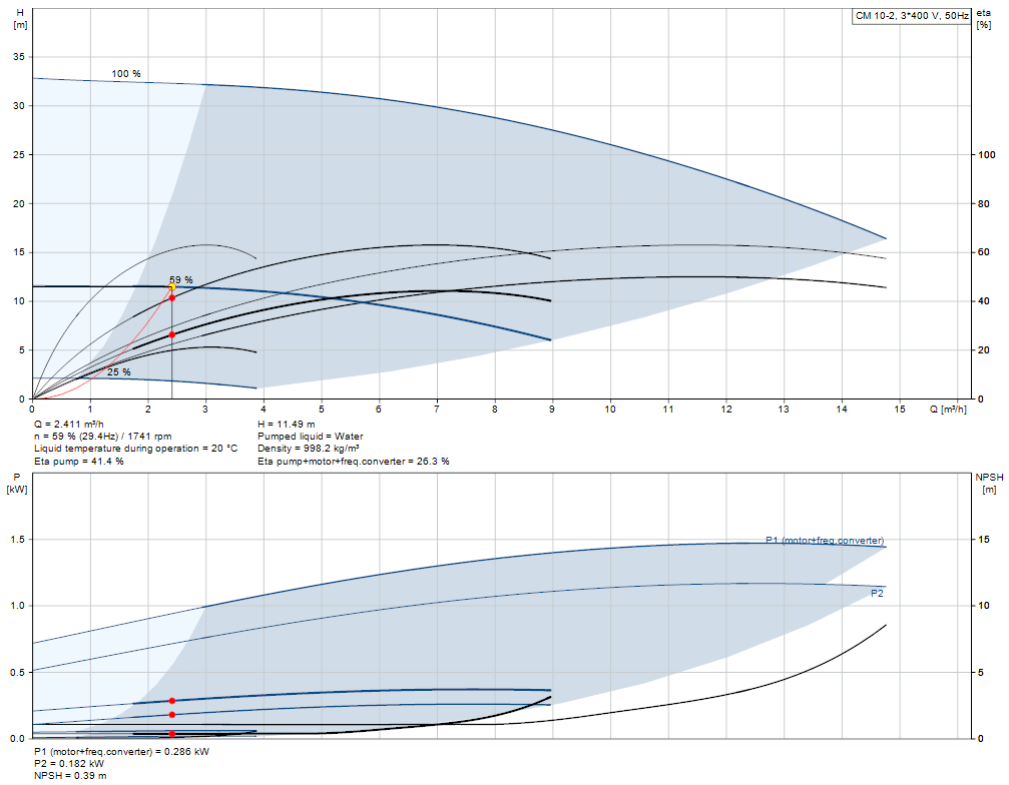


Figura A.2: Gráfica fabricante a 1740rpm. Altura y rendimiento. Fuente: [4]

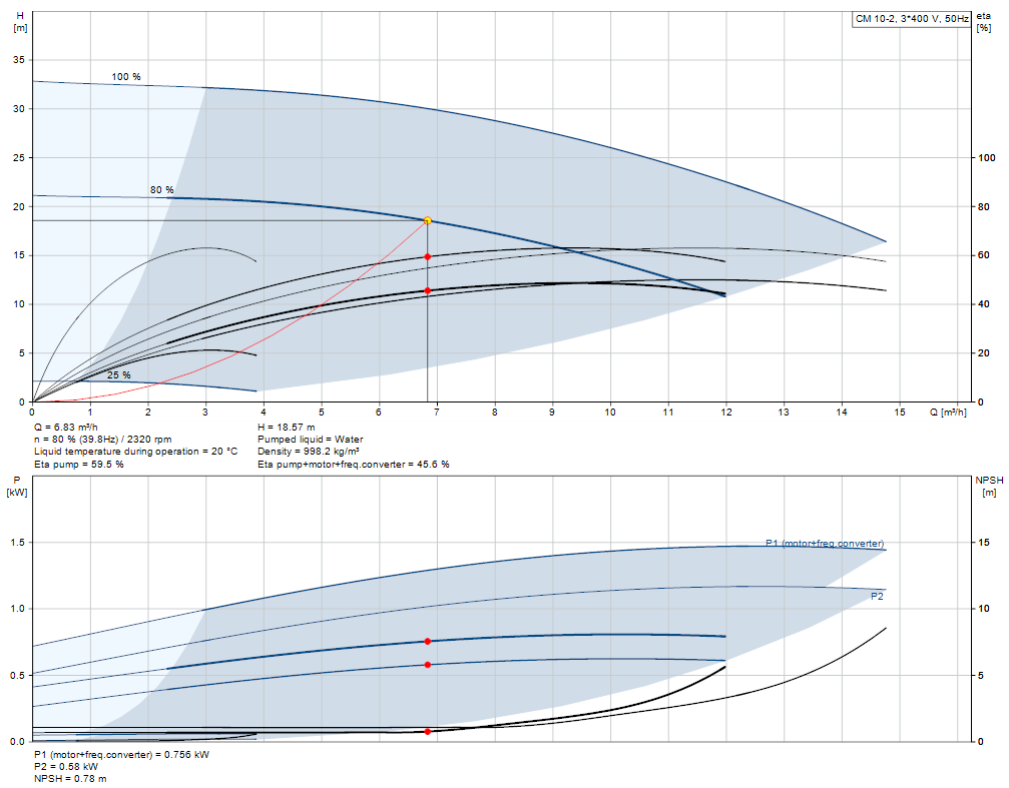


Figura A.3: Gráfica fabricante a 2320rpm. Altura y rendimiento. Fuente: [4]

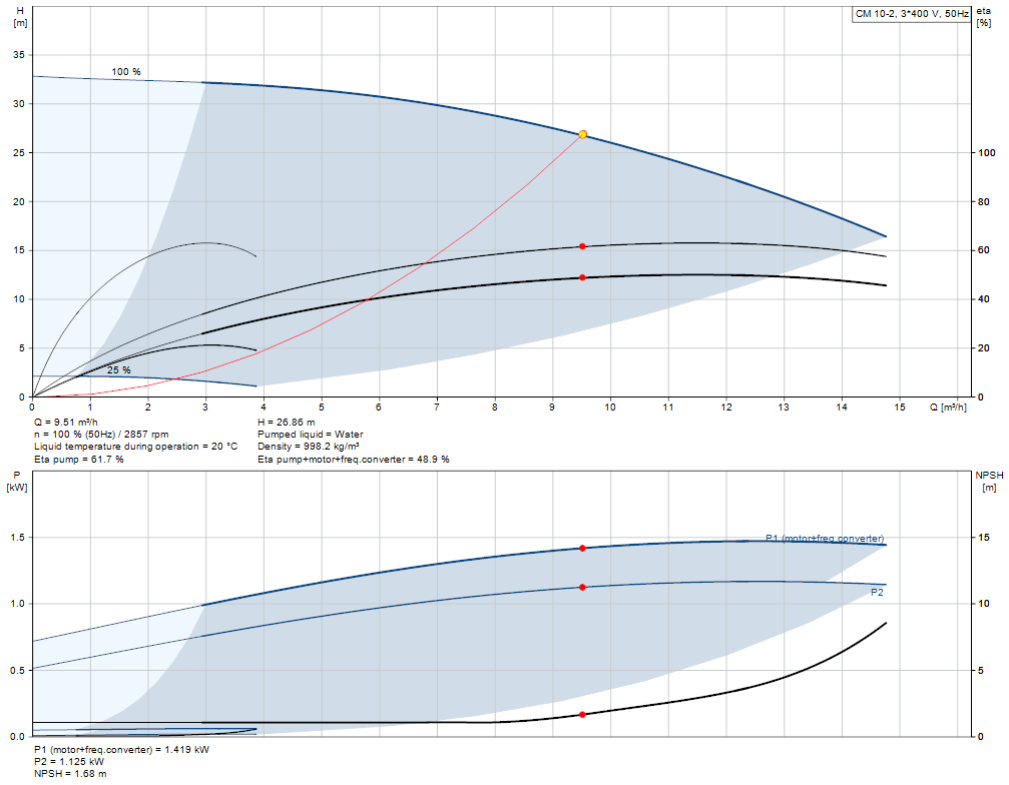


Figura A.4: Gráfica fabricante a 2860rpm. Altura y rendimiento. Fuente: [4]

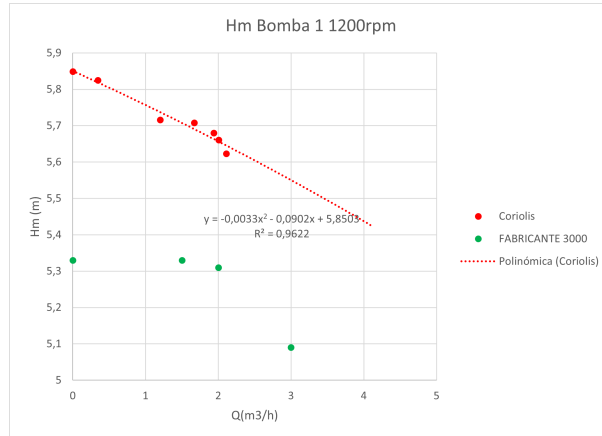


Figura A.5: Bomba 1 individual a 1200rpm frente al fabricante. Fuente: E.P.

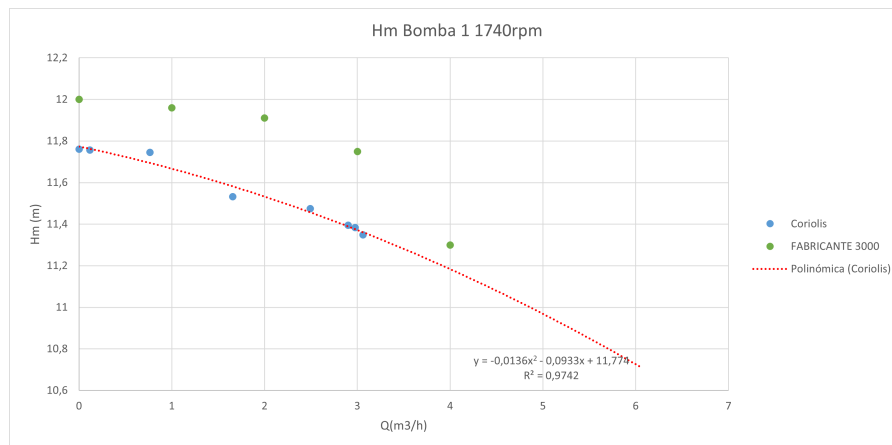


Figura A.6: Bomba 1 individual a 1740rpm frente al fabricante. *Fuente: E.P.*

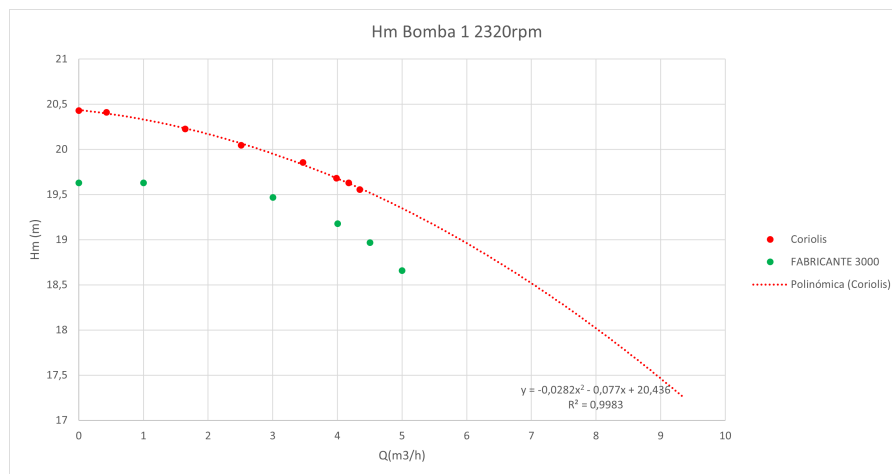


Figura A.7: Bomba 1 individual a 2320rpm frente al fabricante. *Fuente: E.P.*

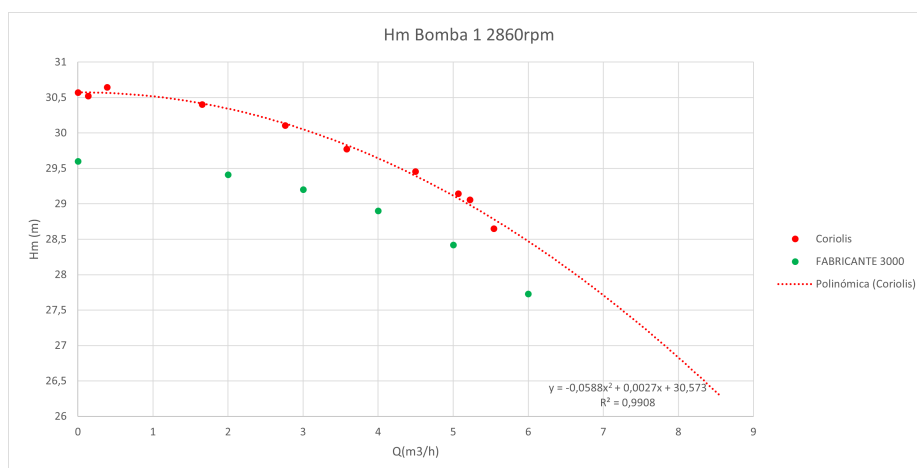


Figura A.8: Bomba 1 individual a 2860rpm frente al fabricante. *Fuente: E.P.*

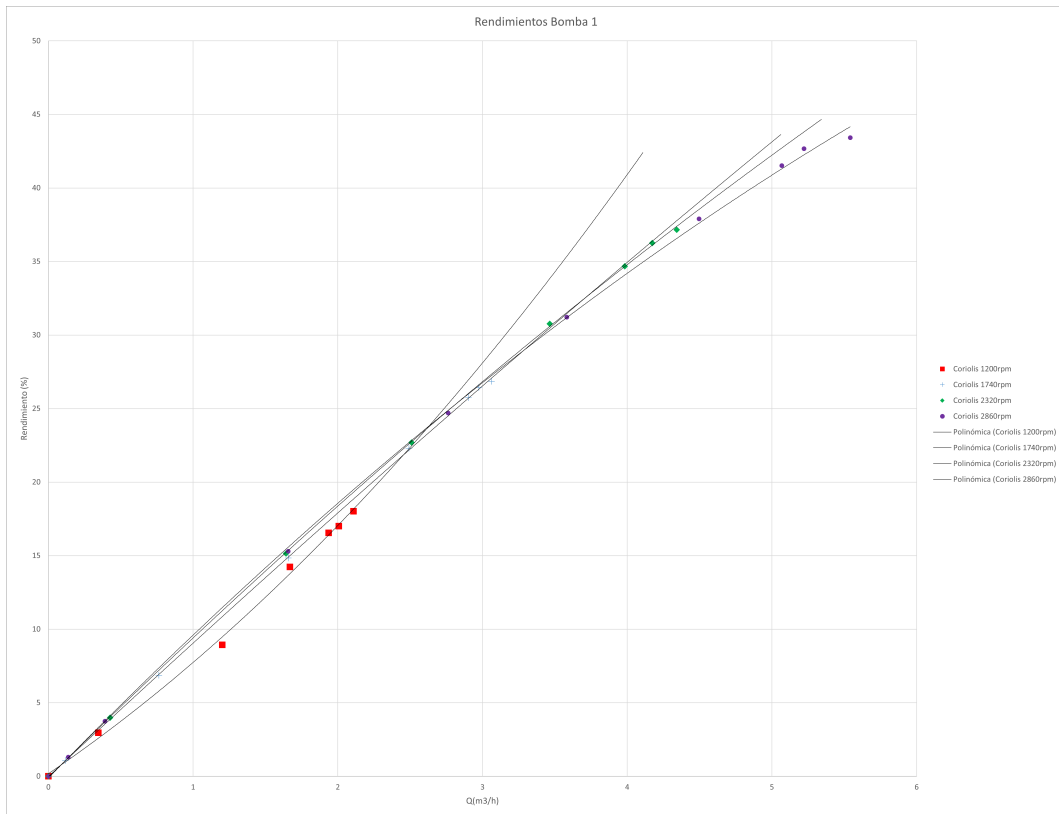


Figura A.9: Rendimientos de la bomba 1 para los cuatro regímenes de giro. Fuente: E.P.