



Máster Universitario en
Sistemas Ferroviarios

IMPLEMENTACIÓN DE UNA SOLUCIÓN DIGITAL PARA LA MEJORA DE PROCESOS ASOCIADOS A LOS EQUIPOS NEUMÁTICOS DE GESTIÓN DEL FRENO DE FRICCIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO: 2019-2020

Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA ICAI

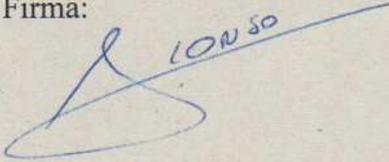
Autor: Marcos Alonso Rebollo

Director: Carlos Sancho de Mingo

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UNA SOLUCIÓN DIGITAL PARA LA MEJORA DE PROCESOS ASOCIADOS A LOS EQUIPOS NEUMÁTICOS DE GESTIÓN DEL FRENO DE FRICCIÓN

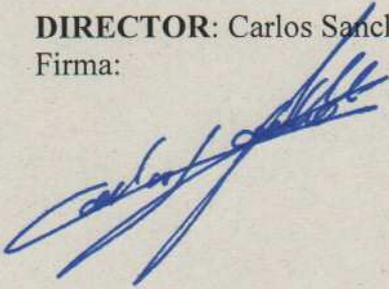
AUTOR: Marcos Alonso Rebollo

Firma:



DIRECTOR: Carlos Sancho de Mingo

Firma:



FICHA TÉCNICA

Apellidos y nombre del autor: Alonso Rebollo, Marcos

Apellidos y nombre del director del Trabajo Fin de Máster: Sancho de Mingo, Carlos

Programa cursado y curso académico: Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios, 2019-2020.

Título del trabajo: Implementación de una solución digital para la mejora de procesos asociados a los equipos neumáticos de gestión del freno de fricción.

Resumen de las principales ideas desarrolladas:

Este Trabajo Fin de Máster surge ante la obsolescencia del sistema actual de pruebas y registro del freno de fricción y la necesidad de mejora continua de los procesos en Metro de Madrid.

Aprovechando estas necesidades, se pretende desarrollar un nuevo sistema de gestión de las pruebas del freno de fricción que permita:

- Mejoras del proceso productivo.
- Reducción del error humano.
- Digitalización de la información.

A lo largo del presente documento se exponen los diferentes aspectos que justifican la necesidad del proyecto, cómo se aborda su desarrollo y cuáles son sus resultados.

Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Importancia del freno	1
1.2. Tipos de freno.....	2
1.3. Freno de fricción	3
1.4. Freno de neumático servicio.....	4
1.5. Freno de emergencia	4
1.6. Esquema funcional	4
2. OBJETIVOS.....	6
3. PLANIFICACIÓN DE TAREAS	6
4. TAREAS DEL TFM.....	8
4.1. Análisis de la situación actual.	8
4.2. Análisis de posibilidades	9
4.3. Estudio de los sistemas electro-neumáticos actuales.....	10
4.4. Requerimientos de la solución	12
4.5. Definición del equipamiento	14
4.6. Montaje del hardware.....	15
4.7. BBDD de configuración.....	17
4.8. Desarrollo de la aplicación para el freno de emergencia.....	18
4.9. Interfase de usuario para el freno de emergencia.	21
4.10. Desarrollo de la aplicación para el freno de servicio.	27
4.11. Interfase de usuario para el freno de servicio.....	29
4.12. BBDD de resultados.....	35
4.13. Integración hardware-software.....	37
4.14. Validación del sistema completo.....	38
5. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	41
6. BIBLIOGRAFÍA.....	42

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Esquema neumático.	5
Ilustración 2. Diagrama GANTT.	6
Ilustración 3. Impresora actual.	8
Ilustración 4. Registro actual.	9
Ilustración 5. Modelo DL850E.	10
Ilustración 6. Modelizado de la presión en cilindros.	11
Ilustración 7. Electroválvula AW4.	13
Ilustración 8. Curva de transductor.	15
Ilustración 9. Conversor A/D.	14
Ilustración 10. Esquema hardware.	16
Ilustración 11. Conexiones.	17
Ilustración 12. Inicialización y carga de BBDD.	19
Ilustración 13. Máquina de estados freno emergencia.	19
Ilustración 14. Espera activa y disparo freno de emergencia.	20
Ilustración 15. Volcado de fase.	21
Ilustración 16. Registro en BBDD freno de emergencia.	21
Ilustración 17. Parámetros contextualización.	22
Ilustración 18. Sin conexión PC-A/D.	23
Ilustración 19. Visores de las presiones.	23
Ilustración 20. Pantalla de Test.	24
Ilustración 21. Visores de parametrización.	25
Ilustración 22. Informe parcial de freno E1.	26
Ilustración 23. Observaciones específicas.	27
Ilustración 24. Lectura A/D.	28
Ilustración 25. Máquina de estados AW4.	28
Ilustración 26. Espera activa AW4.	29
Ilustración 27. Registro en BBDD de prueba AW4.	29
Ilustración 28. Parámetros prueba de servicio.	30
Ilustración 29. Visores AW4.	31
Ilustración 30. Pantalla de pruebas AW4.	31
Ilustración 31. Visores AW4.	32
Ilustración 32. Informe parcial de freno AW4.	33
Ilustración 33. Solicitud de ajuste.	34
Ilustración 34. Observaciones específicas AW4.	34
Ilustración 35. Vista de la BBDD general del freno de emergencia.	35
Ilustración 36. Informe parcial de aflojamiento E1 y E2.	36
Ilustración 37. Vista de la BBDD general del AW4.	36
Ilustración 38. Informe parcial de aflojamiento AW4.	37

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros de ajuste por panel.	17
Tabla 2. Ahorros de tiempo.	39
Tabla 3. Revisiones anuales.	40

1. INTRODUCCIÓN

Entre las actividades que se realizan en Metro de Madrid están las relacionadas con el mantenimiento del material móvil que circula por sus líneas. Estas tareas están recogidas en los diversos planes de mantenimiento [1], asociados a las diversas series de material móvil. Entre ellas se encuentran las que afectan a la revisión y reparación de los equipos neumáticos del tren (compresores, valvulería, ...).

Parte de los equipos neumáticos intervienen en el sistema de frenado de fricción, concretamente los paneles neumáticos, que se encuentran embarcados en las unidades, tienen, entre otras misiones, que gestionar tanto el freno de servicio (proporcional a la posición de freno de la maneta del conductor o la orden emitida por el ATO) como el freno de emergencia (actuación de la seta de emergencia, orden del sistema ATP, ...). Todas las funciones de los paneles neumáticos vienen descritas en las normas técnicas [2] de Metro de Madrid referidas a estos paneles. Además, como constituyen parte de un sistema de seguridad del tren se requieren pruebas concretas y el registro de las mismas, de acuerdo a las directrices del fabricante [3].

1.1. Importancia del freno

En todo sistema que goza de capacidad de movimiento, por lo general, se tiende a hablar de la velocidad que puede alcanzar, pero tan importante como esa magnitud es determinar cómo reducir la velocidad. Es necesario disponer de mecanismos que permitan reducir o anular ese movimiento con garantía de seguridad y dentro de unas distancias razonables establecidas de antemano, con el objetivo de evitar o minimizar daños ante situaciones sobrevenidas.

En concreto, en los sistemas ferroviarios de transporte metropolitano, como es el caso de Metro de Madrid, las unidades pueden llegar a alcanzar los 110km/h de velocidad máxima. Además, el contacto rueda-carril implica un coeficiente de fricción muy bajo, lo que implicaría una distancia de parada de la composición de varios km si se hiciera por su propia inercia.

En consecuencia, se hace necesario, tanto para una operativa adecuada como para poder reaccionar ante emergencias, que las unidades dispongan de sistemas controlables y fiables de reducción de la velocidad.

Uno de los principales problemas que presentan los sistemas de freno y tracción en el sistema ferroviario es el control del deslizamiento. Que si bien es un fenómeno necesario tienen que estar controlado para evitar desgastes en las ruedas y railes.

1.2. Tipos de freno

Como se puede llegar a conocer en la asignatura “Dinámica de material rodante y freno” [4] del máster en sistemas ferroviarios, existen numerosos tipos de freno. En las composiciones de Metro de Madrid podemos encontrarnos los siguientes tipos:

Freno regenerativo – Mediante el empleo de los motores de tracción actuando como generadores se consigue transformar la energía cinética de la composición en energía eléctrica que es inyectada en la catenaria. Es un tipo de freno con las ventajas:

- ✚ No genera desgaste en ninguno de sus elementos.
- ✚ Es sostenible (no solo no consume energía, sino que la genera).
- ✚ Es totalmente controlable en su grado de aplicación.

Sin embargo, este freno no es adecuado para un freno de seguridad, dado que no siempre la infraestructura es receptiva a la devolución de energía. Los requerimientos de la infraestructura para ser receptiva se pueden conocer cursando las asignaturas “Electrificación Ferroviaria” [5] y “Gestión de la energía y de los recursos del operador” [6], ambas del máster en sistemas ferroviarios. Básicamente es que la inyección de la energía no suponga superar un valor máximo de la tensión en la catenaria. Para ello se necesita o un tren cercano que se encuentre en un proceso de aceleración (para lo cual se juega desde la operativa con la secuencia de movimientos de las diversas unidades para ajustar los momentos de frenada de unas unidades con los de aceleración de otras) o con convertidores DC/AC, dado que en Metro de Madrid la catenaria es siempre en DC, en las subestaciones que permitan enviar esta energía a la compañía eléctrica.

Freno reostático – Mediante el empleo de los motores de tracción actuando como generadores se consigue transformar la energía cinética de la composición en energía eléctrica que es quemada en un reostato. Este tipo de freno tiene como ventajas:

- ✚ No genera desgaste, aunque si fuertes disipaciones de calor que dañan el reóstato con el uso por lo que requiere de mantenimiento periódico.
- ✚ Es totalmente controlable en su grado de aplicación.
- ✚ Es independiente del estado de la infraestructura.

Sin embargo, este freno no es adecuado para un freno de seguridad, dado que el reóstato está limitado en su capacidad de disipación de la energía calorífica generada. Además, tienen el inconveniente de la pérdida de confort debido a las altas temperaturas locales que se pueden llegar a alcanzar.

Freno de fricción – Mediante el empleo de una energía externa, como es el aire comprimido en el caso de Metro de Madrid, movemos unas zapatas (o pastillas) para que entren en contacto con los discos de freno (o la llanta). Como consecuencia de esta fricción entre una parte fija (las zapatas o pastillas) y otra solidaria al eje (la llanta o el disco) conseguimos reducir la energía cinética de la composición transformándola en calor. Este tipo de freno tiene como ventajas/desventajas:

- ✚ Genera desgaste en las zapatas/pastillas y disco de freno/llanta. Como consecuencia el sistema requiere de mantenimiento periódico.
- ✚ Es totalmente controlable en su grado de aplicación.
- ✚ También es aplicable cuando el tren está parado, por lo que permite ser empleado como freno de estacionamiento.

Históricamente este es el freno que se ha considerado como seguro para un freno de seguridad.

1.3. Freno de fricción

El sistema de freno de fricción en las unidades de Metro de Madrid está distribuido, de forma que nos encontraremos en ellas los siguientes elementos:

- ✓ En cada eje de la composición se dispone de un actuador (cilindro de freno) y el correspondiente sistema de fricción (cilindro/pastilla o zapata/rueda).
- ✓ En cada coche de la composición (excepto en las unidades 5000 que por su antigüedad no montan este sistema) se dispone de un panel electro-neumático y una central electrónica de control que, a partir de una orden común para toda la composición, gestiona la correcta aplicación del freno neumático en sus cuatro ejes.
- ✓ A lo largo de la composición se dispone de compresores y de depósitos de aire comprimido para garantizar esta fuente de energía.

Con este sistema se gestionan los siguientes tipos de frenos:

- ✚ Estacionamiento. Este tipo de freno afecta, en las unidades de Metro de Madrid, a la mitad de los ejes. Su funcionamiento es de seguridad de modo que ante una pérdida de la energía (en forma de aire comprimido) se produce la fricción y, en consecuencia, el frenado de la composición.
- ✚ Neumático de servicio. Actúa sobre todos los ejes de manera proporcional a la petición de freno (sea del conductor o del ATO) y en coordinación con el freno eléctrico.
- ✚ Emergencia. Actúa sobre todos los ejes de la composición cuando se actúa sobre la seta de emergencia, el manipulador es llevado a la posición de emergencia o el ATP detecta una situación crítica.

1.4. Freno de neumático servicio

Englobado dentro del freno de fricción su misión es actuar de manera proporcional a la solicitud de freno por parte de la unidad. Actúa en coordinación con el freno eléctrico según sea indicada su necesidad por el equipo de tracción. Sus características son:

- Control electroneumático proporcional mediante la válvula AW4.
- Actuación sobre todos los ejes de la composición.
- Control de la presión de freno regulada en función de la carga del coche.
- De lógica directa (requiere aire comprimido para frenar).

1.5. Freno de emergencia

Dentro de los sistemas de freno, como hemos visto, está el freno de emergencia. En el caso de Metro de Madrid tienen las siguientes características:

- Control electroneumático de todo/nada mediante electroválvulas.
- Actuación sobre todos los ejes de la composición.
- Control de la presión de freno regulada en función de la carga del coche.
- De lógica directa (requiere aire comprimido para frenar).
- Control electroneumático redundado (1º canal y 2º canal).

1.6. Esquema funcional

El control electro-neumático está implementado mediante un equipo electrónico y un panel electroneumático. El esquema base de este panel es el reflejado en la Ilustración 1. Esquema neumático. En él se pueden destacar:

- Toma 6. Salida de aire comprimido como energía para atacar a los cilindros neumáticos (actuadores del freno de fricción).
- Toma 13. Entrada de aire comprimido como señal proporcional a la carga de la caja.
- Válvula reguladora en función de la carga Cr1 y Cr2. Válvula que modifica la señal de entrada, procedente de las electroválvulas de emergencia o de la AW4, con el objetivo de amoldarse al peso real de la caja.
- Toma 7. Entrada de aire comprimido procedente de la tubería principal para alimentar al segundo canal de freno.

- Toma 14. Entrada de aire comprimido procedente de la tubería principal para alimentar al primer canal de freno.
- Electroválvulas E1 y E2. Son las que liberan, por orden del equipo electrónico, la actuación del freno de emergencia. Están claramente definidas en su norma técnica [7].
- Transformador analógico AW4. Válvula que, controlada por el equipo electrónico, nos generara la consigna de freno de servicio. Está descrita su funcionalidad y características en su norma técnica [8].

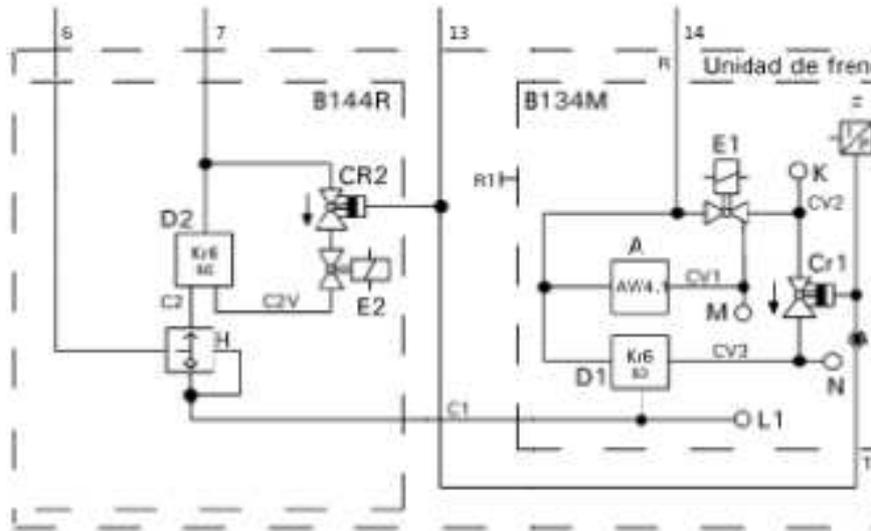


Ilustración 1. Esquema neumático.

- Válvula relé KR6. Relé neumático cuya misión es dar potencia neumática (caudal de aire comprimido) a su salida manteniendo la presión que le llega como consigna.
- Válvula H. Válvula de doble entrada (salida del primer canal y salida del segundo canal) que pone como salida la entrada de mayor presión.

2. OBJETIVOS

Los objetivos que se persiguen con el presente proyectos son, globalmente, participar en la actualización de los sistemas productivos de Metro de Madrid. Mas concretamente:

- ✚ Incrementar la seguridad de las pruebas. Eliminando errores humanos durante el proceso.
- ✚ Mejorar el proceso productivo. Para ello se buscará una reducción del tiempo total requerido y la detección de errores humanos mediante la automatizando de ciertas tareas y la cooperación con el usuario en el resto.
- ✚ Generar una BBDD. Permitiendo la posterior búsqueda de resultados de forma ágil, y eliminando el error humano durante el archivado.
- ✚ Digitalizar el proceso. Dar un primer paso que permita en el futuro realizar análisis y toma de decisiones.

3. PLANIFICACIÓN DE TAREAS

Las tareas identificadas y su planificación temporal se representan en el diagrama GANTT mostrado en la Ilustración 2. Diagrama GANTT.

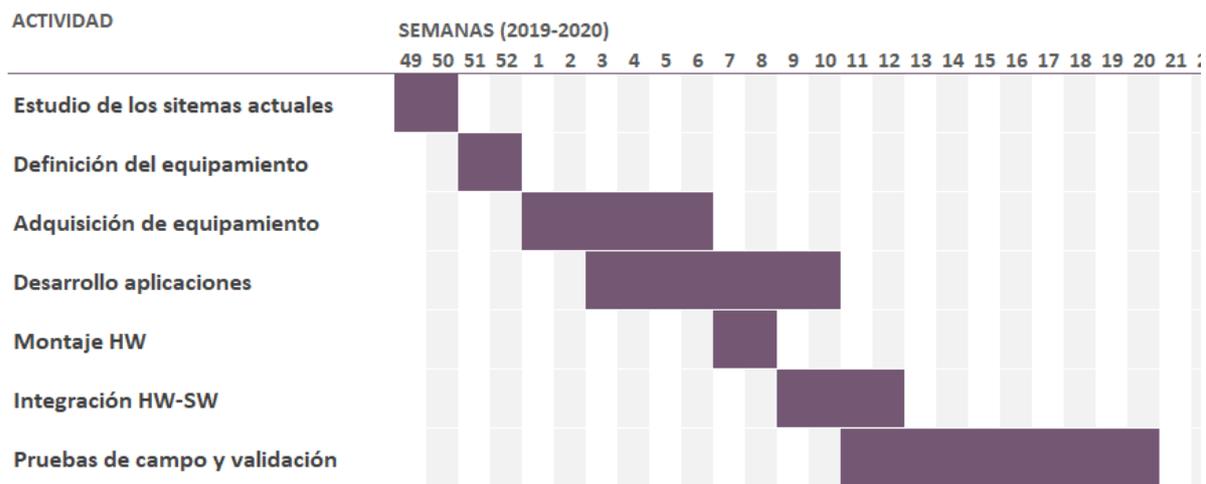


Ilustración 2. Diagrama GANTT.

Más en detalle las tareas establecidas consisten en:

- **Estudio de los sistemas actuales.** Se realiza durante la primera quincena de diciembre de 2019. Consistirá en analizar la documentación correspondiente a todos los equipos de gestión neumático del freno de fricción viendo similitudes y diferencias.
- **Definición y adquisición de los equipos.** Se extiende, aproximadamente, desde el 15 de diciembre de 2019 hasta el 15 de febrero de 2020 y comprende:
 - Una vez analizados los sistemas se tiene que definir la solución a adoptar y, por tanto, el equipamiento necesario para poder realizar las tareas exigidas.
 - Definido el equipamiento se realiza la tramitación para la adquisición/suministro del mismo.
- **Desarrollo del software y montaje hardware.** Dura desde del 15 de enero al 30 de marzo de 2020. Se desarrollan las aplicaciones informáticas. Lógicamente tendrán que cumplir con todos los requisitos exigidos. Posteriormente/simultáneamente se realizará el montaje del hardware y se realizará la integración de las aplicaciones con los sistemas de adquisición.
- **Pruebas de campo y validación.** Del 16 de marzo al 31 de mayo de 2020. Se verifica el correcto funcionamiento de la solución adoptada y se pondrá en producción.

4. TAREAS DEL TFM

A lo largo del presente punto iremos desgranado el trabajo realizado, la estructura seguida es la siguiente:

- En primer lugar, justificaremos la necesidad de desarrollar este proyecto. Apartados 4.1 y 4.2
- Seguidamente, se indicarán cuáles son los requisitos esenciales del proyecto. Apartados 4.3 y 4.4.
- Tras la definición pasaremos a detallar cual es la solución diseñada, tanto desde el punto de vista hardware como software. Apartados 4.5 a 4.13.
- Finalmente se validará la solución implementada. Apartado 4.14

4.1. Análisis de la situación actual.

En la actualidad los paneles de freno se prueban de forma manual, de entre esas pruebas cabe destacar el registro de los parámetros del freno de emergencia y de servicio. Estos registros se realizan mediante una impresora de papel cuyas entradas son dos señales analógicas donde se conectan dos transductores.



Ilustración 3. Impresora actual.

Sin embargo, este sistema presenta varios problemas:

- Baja mantenibilidad de la impresora y sus transductores.
- Impresión en papel sin posibilidad de digitalización directa.
- Coste de adquisición de los consumibles.

- Cálculo de los parámetros de validación realizados de forma manual sobre el papel impreso. Como se puede apreciar en la Ilustración 4. Registro actual.
- Impresión de los códigos de identificación de la prueba de forma manual.
- Archivado de los impresos de forma manual. Con errores humanos que dificulta su búsqueda/localización.
- Dificultad alta para localizar una prueba concreta y realizar comparaciones entre pruebas.

Además, en la actualidad, este sistema tiene una tasa de fallo muy alta que está generando perturbaciones en el día a día.

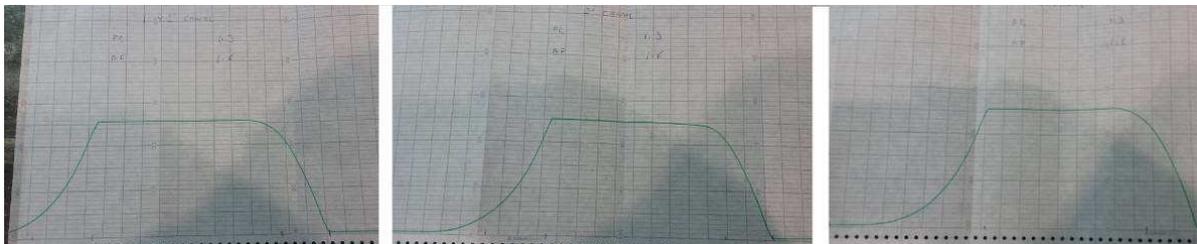


Ilustración 4. Registro actual.

4.2. Análisis de posibilidades.

Ante la situación de amenaza de parada de la producción, motivada por una posible avería del sistema de captura y registro del freno de emergencia y del freno de servicio, se decide valorar las diversas posibles soluciones que hay en el mercado y escoger la más apropiada. Se consideran las siguientes posibilidades:

Solicitud de ofertas por el mismo equipo o similar. Realizando una prospección en el mercado nos encontramos que este tipo de equipos ya no se comercializan. Por consiguiente, esta posibilidad queda descartada automáticamente.

Solicitud de ofertas de reparación. Puestos en contacto con el fabricante del equipo comunican que, aun suponiendo que puedan reparar el equipo, no dan garantía de reparación en estos equipos debido a su antigüedad y a la obsolescencia de sus componentes. Como consecuencia de esta respuesta se rechaza automáticamente la reparación.

Búsqueda de equipos alternativos. Se contacta con varios suministradores de equipos de medición y sus propuestas son, todas ellas, la de equipos de adquisición de datos de carácter genérico. Debido a estas características presentan los siguientes inconvenientes:

- Alto coste (>15000€).
- Prestaciones muy superiores a lo necesario.
- Manejo complejo y quizás poco intuitivo para el usuario final.
- Sigue siendo un sistema que propicia el error humano en la identificación y archivado de los registros.

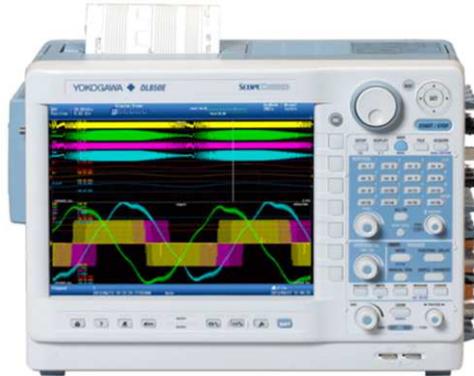


Ilustración 5. Modelo DL850E.

Implementación de un equipo específico diseñado internamente. Se analiza la posibilidad de realizar internamente el desarrollo de una aplicación y la compra de los elementos necesarios para el sistema de adquisición de datos. El coste estimado, empleando los recursos internos, es de unos 800€. Esta opción aporta, además, la ventaja de poder diseñar un entorno a medida para el usuario final y permitirá en el futuro realizar mejoras de forma ágil.

A la vista de las ventajas y desventajas mostradas se opta por la implementación de un diseño específico desarrollado internamente.

4.3. Estudio de los sistemas electro-neumáticos actuales

Para poder desarrollar el proyecto es necesario, en primer lugar, conocer las necesidades por ello se procede a analizar los diversos paneles neumáticos. Centrándose en las diferencias funcionales y requerimientos del fabricante para su validación.

Fundamentalmente se encuentran tres diferencias básicas:

- I. Tipo de conectores eléctricos. Cada serie de material móvil dispone de unos conectores específicos. No obstante, esta diferencia no afecta a este trabajo dado que el conexionado eléctrico y neumático se realiza mediante el equipamiento actual del banco electro-neumático.

- II. Regulación del freno. Cada panel se caracteriza por seguir una curva de comportamiento que relaciona la consigna de freno con la presión neumática transmitida a sus respectivos cilindros. Esta modificación se debe, básicamente, al ajuste para compensar la carga real de la caja.

Esta curva se modeliza, como se puede apreciar en la Ilustración 6. Modelizado de la presión en cilindros., mediante tres rectas cuyo significado es:

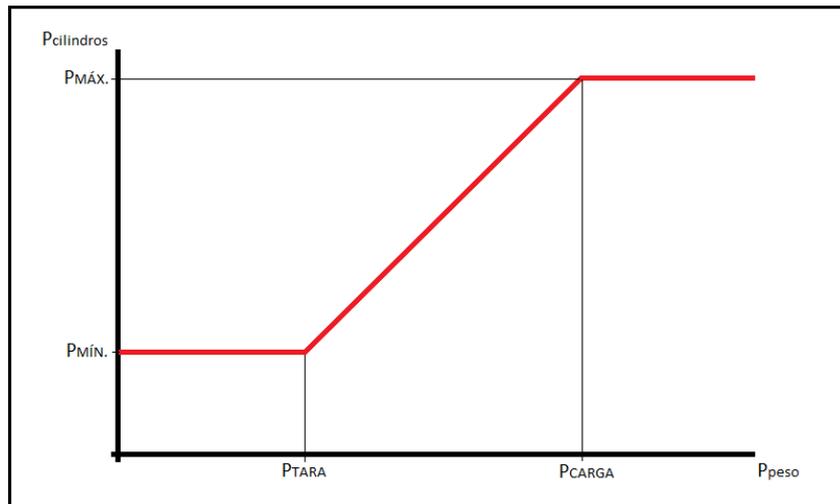


Ilustración 6. Modelizado de la presión en cilindros.

- ✚ Para valores de carga inferiores a la tara de la caja (P_{TARA}) se considera un defecto del sistema de medición. En consecuencia, se debe de frenar con una presión ($P_{MÍN.}$) que se corresponde con el cálculo en base al peso de la caja.
 - ✚ Para valores de carga superiores a la carga máxima de la caja (P_{CARGA}) se considera un defecto del sistema de medición. En consecuencia, se debe de frenar con una presión ($P_{MÁX.}$) que es la calculada suponiendo el peso total como la suma de del peso de la caja más el peso de los pasajeros a carga completa.
 - ✚ Para valores de carga intermedios a los indicados anteriormente se aplica un cálculo lineal. De este modo se mantiene la deceleración máxima constante independientemente de la carga que se transporte.
- III. Valvulería diferente en función de la serie de material móvil. No obstante, la funcionalidad se mantiene en todos ellos y no afecta por tanto al desarrollo de este trabajo.

En resumen, todos los paneles pueden, desde el punto de vista del sistema que se está implementando, tratarse de la misma manera sin más que gestionar una BBDD que identifique los diversos paneles con sus características de ajuste.

Esto es posible porque para la interconexión electro-neumática se empleará el sistema actual de control que ya contempla las diferencias del punto I.

Hay que destacar que, como se especificará más adelante, la prueba de transformador analógico AW4 dispone de su propio banco de pruebas. Para este banco no hay ninguna diferencia entre probar el AW4 de una serie u otra.

4.4. Requerimientos de la solución

Tenemos dos sistemas independientes a probar. En primer lugar, asociado al freno de emergencia, debemos controlar el tiempo que tarda el sistema en pasar de un estado de reposo a un nuevo punto estacionario.

Estas pruebas se realizan a panel montado, siguiendo las directrices del fabricante. Luego la forma de generar las perturbaciones, y por tanto las pruebas asociadas, es mediante la excitación o desexcitación de las electroválvulas de emergencia. El fabricante exige realizar y registrar las siguientes pruebas:

- Freno de emergencia mediante el primer canal de freno (excitación de E1).
- Aflojamiento del freno de emergencia (desexcitación de E1).
- Freno de emergencia mediante el segundo canal de freno (excitación de E2).
- Aflojamiento del freno de emergencia (desexcitación de E2).
- Freno de emergencia conjunto entre ambos canales de freno (excitación de E1 y E2 simultáneamente).
- Aflojamiento del freno de emergencia (desexcitación de E1 y E2 simultáneamente).

Durante la realización estas pruebas, es necesario, como prescribe el fabricante, controlar las variables:

- Tiempo de reacción.
- Presión en los cilindros (P_{CIL}).
- Presión de referencia de la carga del coche (P_{CAR}).
- Verificación del canal dominante.

Por su parte, asociado al freno de servicio, el fabricante exige realizar estas pruebas de manera independiente al panel neumático.

No olvidemos que la función de esta válvula es generar una consigna de freno (P_{Cv}) proporcional a la petición de freno por parte de la unidad.

Para generar esta consigna el equipo electrónico controla las dos electroválvulas de la AW4 y comprueba la señal de salida mediante el transductor de presión de la AW4.

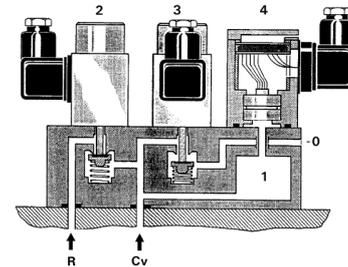


Ilustración 7. Electroválvula AW4

En nuestro caso emplearemos el banco externo actual que está equipado para poder realizar la excitación o desexcitación de las dos electroválvulas. Como se puede entender mediante la Ilustración 7. Electroválvula AW4, una (la número 2) se emplea para presurizar la salida neumática (Cv) y la otra (la número 3) para despresurizarla.

El fabricante prescribe la realización de las siguientes pruebas:

- Presurización de la cámara de salida ($P_{Cv} \cdot 6\text{bar}$) con una corriente de excitación de 380mA.
- Despresurización de la cámara de salida ($P_{Cv} \cdot 0\text{bar}$) con una corriente de excitación de 380mA.
- Presurización de la cámara de salida ($P_{Cv} \cdot 6\text{bar}$) con una corriente de excitación de 700mA.
- Despresurización de la cámara de salida ($P_{Cv} \cdot 0\text{bar}$) con una corriente de excitación de 700mA.

Durante este proceso deberemos controlar y registrar las variables:

- Tiempo de reacción.
- Presión consigna de freno (P_{Cv}).
- Presión de entrada (P_R).

Analizando las necesidades de ambas pruebas vemos que podemos fusionar la equipación necesaria de forma que, para poder realizar el proceso de validación, necesitaremos:

- Sensor de la presión de salida (P_{CIL} o P_{Cv}).
- Sensor de la presión de entrada (P_{CAR} o P_R).

- Medidor de tiempo entre el punto de disparo y el punto objetivo.
- Control de activación de la emergencia 1 (implementado en el banco general).
- Control de activación de la emergencia 2 (implementado en el banco general).
- Control de activación de la electroválvula de presurización de la AW4 (implementado en el banco particular del AW4).
- Control de activación de la electroválvula de despresurización de la AW4 (implementado en el banco particular del AW4).
- Dispositivo que sea capaz de mostrar la información capturada.
- Dispositivo que sea capaz de guardar/imprimir los resultados.

Además, desde el punto de vista del usuario, la interfase debe ser lo más intuitivo y amigable posible. Evitando el exceso de controles y mostrando claramente la información relevante. Con este objetivo y dado que las pruebas se realizan de forma independiente (tanto temporal como físicamente) se toma la decisión de desarrollar dos aplicaciones independientes la una de la otra.

4.5. Definición del equipamiento

Una vez que tenemos definido el alcance hay que diseñar el hardware que se requiere para poder implementar la solución. El equipamiento básico será:

- Un convertor A/D. → NI USB 6003 [10]. Se trata de un convertidor analógico/digital de la empresa National Instrument.

Este dispositivo se comunica con el exterior mediante el estándar USB. Además, se alimenta mediante este mismo estándar.

Dispone de hasta cuatro canales analógicos de entrada (en modo diferencial), dos canales analógicos de salida y doce canales digitales. En nuestro caso emplearemos dos canales analógicos de entrada, para la medición de las señales de presión, y, durante la fase de desarrollo, otros dos canales analógicos de entrada y los dos de salida.

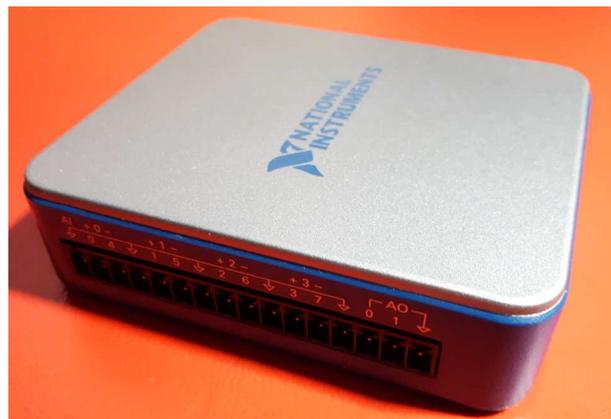


Ilustración 8. Convertor A/D.

- Dos transductores. → Se empleará el modelo P3290 [9] con un fondo de escala de 0 a 6bar y una respuesta lineal, en ese rango, de 0 a 10V como se aprecia en la Ilustración 9. Curva de transductor. El rango de medición y precisión (error menor a 0.1% del fondo de escala) de este transductor es suficiente para las necesidades de este proyecto.

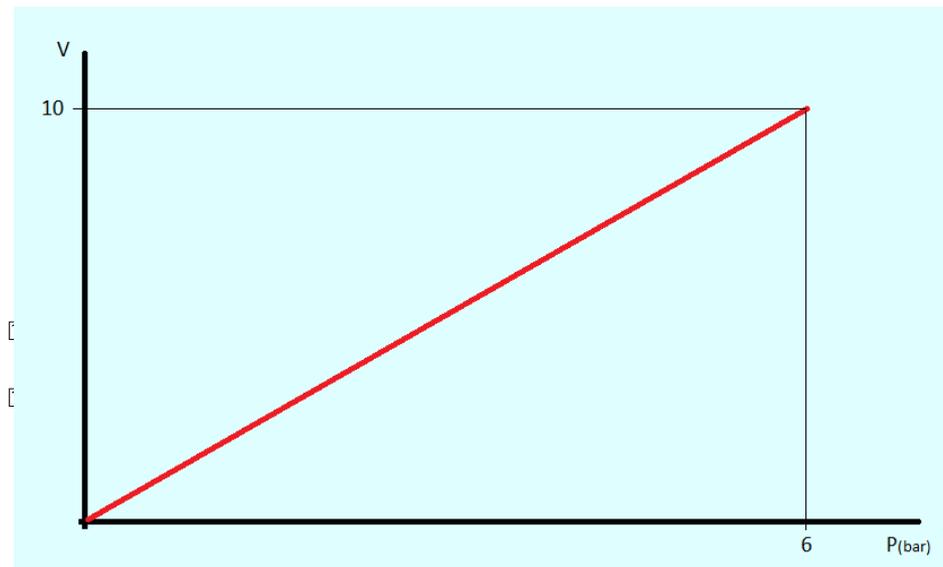


Ilustración 9. Curva de transductor.

- Un alimentador → Alimentador de PC estándar (suministrado por el CDI) de 24Vcc de salida. Este será el encargado de alimentar eléctricamente a los dos transductores de presión.
- Un PC. → El equipo informático donde correrán las aplicaciones será suministrado por el sistema informático corporativo. Este aspecto permitirá una mejor mantenibilidad del sistema da cara al futuro. La exigencia para este equipo informático será la disponibilidad de una entrada USB y la instalación del Run Time de National Instrument.

4.6. Montaje del hardware.

Con los elementos definidos en el punto anterior se ha buscado un sistema que cumpla las siguientes premisas:

- Sencillo. Con el objetivo de reducir el número de averías del sistema.
- Baja mantenibilidad. De forma que sus elementos sean fungibles y rápidamente sustituibles.
- Rápida calibración. Que se pueda realizar una calibración completa (desde los transductores hasta la aplicación) del sistema de forma única y sencilla.

- Con capacidad suficiente para la digitalización de las señales de presión neumática.
- Con puntos de detección de errores por parte de un administrador.

Con el equipamiento seleccionado se realiza el montaje del sistema de adquisición, su esquema eléctrico es el de la Ilustración 10. Esquema hardware. Mostrado a continuación.

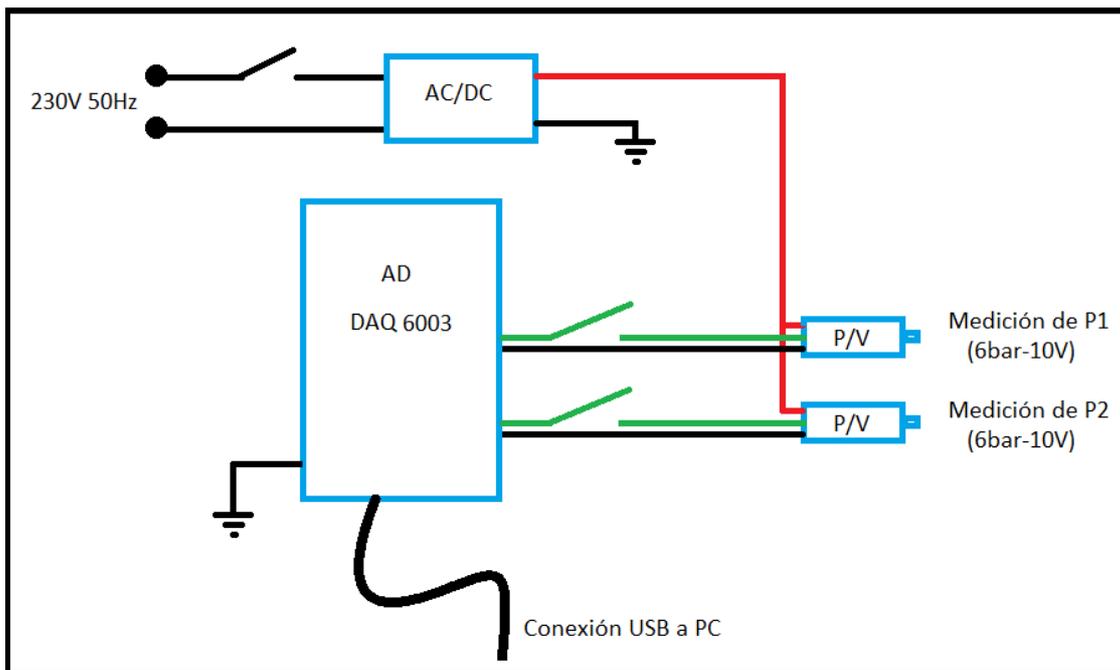


Ilustración 10. Esquema hardware.

A parte, con fines puramente de desarrollo, se han cableado las dos salidas analógicas de que dispone el convertidor a dos de las entradas analógicas del mismo. De este modo durante el desarrollo del software se podrá ir probando en laboratorio las diversas funcionalidades.

Con este montaje, el usuario final solo necesitará, como se aprecia en la Ilustración 11. Conexiones, conectar:

- Los transductores de presión a las tomas del banco y a la caja de pruebas.
- El cable de alimentación de 220V a un enchufe estándar y a la caja de pruebas.
- El cable USB a un puerto del PC.



Ilustración 11. Conexiones

4.7. BBDD de configuración.

Para la aplicación de la válvula de gestión del freno de servicio no se requiere ningún tipo de configuración específica, sin embargo, la prueba del sistema de freno de emergencia exige parametrizar la aplicación para comprobar el correcto funcionamiento del panel. En consecuencia, hay que articular un procedimiento para que la aplicación disponga de esta información.

Con objeto de permitir una escalabilidad futura ante la posible incorporación de nuevos paneles asociados a nuevo material móvil o reformas de los actuales, se determina que estas parametrizaciones sean externas a la aplicación. De este modo al iniciar la aplicación, uno de los primeros pasos será la lectura de esta base de datos. Los datos que incorpora esta BBDD son, como se muestra en la Tabla 1. Parámetros de ajuste por panel., los parámetros que identifican el panel con el material móvil donde van montados y los ajustes que tienen que tener por ir situados en esa posición.

Tabla 1. Parámetros de ajuste por panel.

Serie	Panel	Matrícula	ISTL	Ptara	Tol. Ptara	Pcil.	Tol. Pcil.
7000	B155M	273503	15871	3,1	0,1	3	0,1
7000	B155R	273502	15869	2,6	0,1	1,9	0,1
7000	B155S	273501	15867	3,1	0,1	3	0,1
8000	B155MP	283502	15861	2,5	0,1	2,7	0,1
8000	B155R	283503	15863	2,2	0,1	2,25	0,1
8000	B155S	280907	II55190	2,4	0,1	2,6	0,1
8000	B155MI (3C)	283501	15859	2,5	0,1	2,7	0,1
8000	B155MI (4C)	280908	15965	2,5	0,1	2,7	0,1
9000	B155M	Z90019	II56251	3,3	0,1	2,8	0,1
9000	B155S	Z90026	II56259	3,3	0,1	2,8	0,1

9000	B155R	Z90020	II56231	2,6	0,1	2	0,1
3000	B155M	C32101	II56043	3	0,1	2,5	0,1
3000	B155R1	C32102	II56045	2,65	0,1	1,9	0,1
3000	B155R2	C32126	II56045	3,05	0,1	2	0,1
3000	B155S	C32103	II56047	2,9	0,1	2,4	0,1
8000L2	B155M	B11707	II68195/A	2,65	0,1	2,78	0,1
8000L2	B155R	B11708	II68195/B	2,25	0,1	2,25	0,1
8000L2	B155S	B11709	II68195/C	2,3	0,1	2,55	0,1
8000L1	B155M	B11707	II68195/A	2,9	0,1	2,93	0,1
8000L1	B155R1	B11708	II68195/B	2,25	0,1	2,25	0,1
8000L1	B155R2	B11708	II68195/B	2,35	0,1	2,3	0,1
8000L1	B155S1	B11709	II68195/C	2,45	0,1	2,63	0,1
8000L1	B155S2	B11709	II68195/C	2,6	0,1	2,72	0,1
6000	B155MP	172212	13923	3	0,1	2,45	0,1
6000	B155MI	172211	13921	3	0,1	2,45	0,1
6000	B155R	172402	16468	2,57	0,1	2	0,1
2000B	B134M	189125	12476/51110	2,28	0,1	3,49	0,1
2000B	B144M	189117	12463	2,28	0,1	3,49	0,1
2000B	B134R	189131	12476/52110	2,18	0,1	2,1	0,1
2000B	B144R	189129	12465	2,18	0,1	2,1	0,1
3000L3	B155M1	B31608	II71271/A	2,99	0,1	2,69	0,1
3000L3	B155M2	B31608	II71271/A	3,03	0,1	2,71	0,1
3000L3	B155R1	B31609	II71271/B	2,73	0,1	2,08	0,1
3000L3	B155R2	B31609	II71271/B	2,86	0,1	2,14	0,1
3000L3	B155S1	B31610	II71271/C	2,8	0,1	2,55	0,1
3000L3	B155S2	B31610	II71271/C	2,9	0,1	2,59	0,1

4.8. Desarrollo de la aplicación para el freno de emergencia.

La aplicación a desarrollar para verificar el correcto funcionamiento del freno de emergencia, ha de cumplir con todos los requisitos técnicos establecidos previamente. Ha sido desarrollada en LabVIEW [11]. Se ha elegido este lenguaje de programación por disponer Metro de Madrid de licencia, ser del mismo fabricante que el convertidor A/D y por la sencillez que presenta para el diseño de pantallas gráficas.

El código desarrollado está estructurado pensando en la facilidad de comprensión por parte de los programadores y, obviamente, en la estabilidad y robustez del mismo.

Su estructura está basada en tres bloques funcionales independientes y secuenciales.

El primer bloque busca partir de un estado conocido y seguro. Para ello se realiza la inicialización de diversos parámetros y carga la BBDD de configuración.

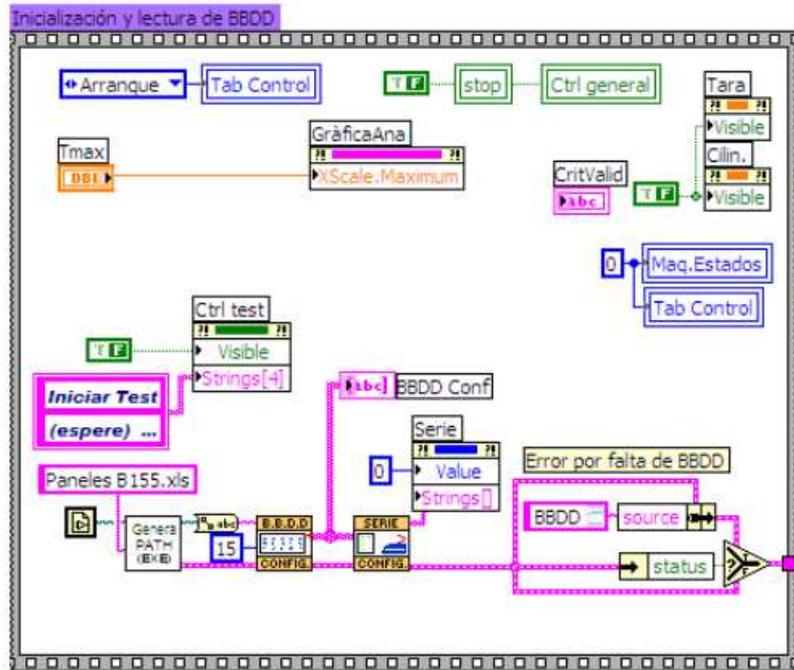


Ilustración 12. Inicialización y carga de BBDD.

El **segundo bloque** es, básicamente, una máquina de estados, como se puede apreciar en la Ilustración 13. Máquina de estados freno emergencia.

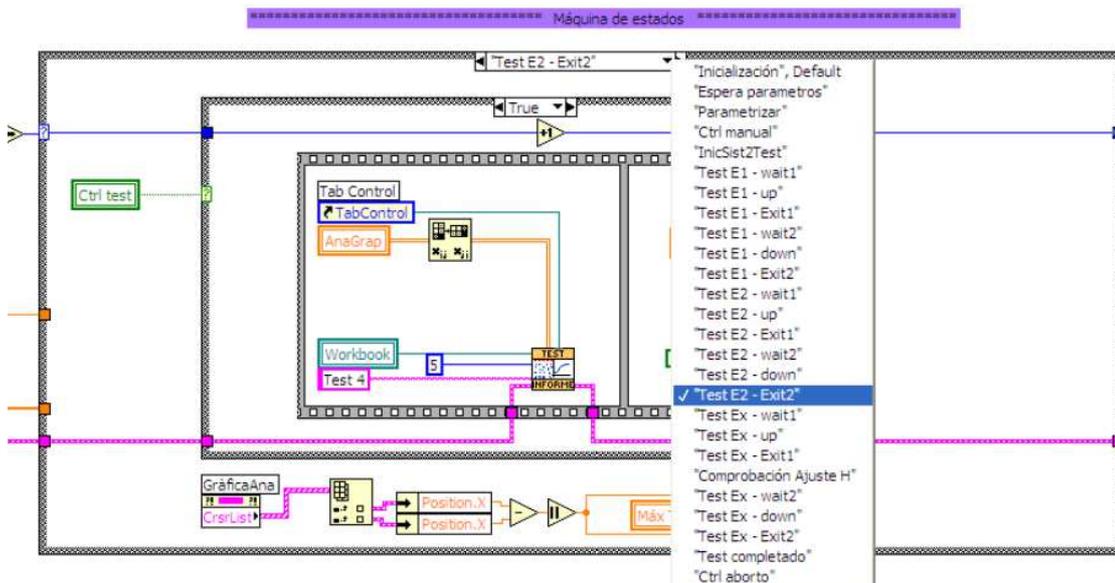


Ilustración 13. Máquina de estados freno emergencia.

Este bloque es el núcleo fuerte de la aplicación dado que en él se gestiona el proceso de

adquisición de datos y la interacción con el usuario. Las características más relevantes de este bloque son:

- ✚ Petición de los datos de contexto de la prueba. Se solicitará la información necesaria (referencia del panel, usuarios, ...) para contextualizar la prueba. Dada la importancia de esta información se comprueba que se introducen los datos y la coherencia entre ellos. De no estar completa o ser incoherente se avisará al usuario de los errores detectados y se impedirá continuar. Esta información formará parte del registro final.
- ✚ A partir de los datos de contexto introducidos por el usuario, se extrae de la BBDD de configuración de paneles, los parámetros concretos que corresponden al panel indicado y son mostrados al usuario de forma que no tenga que buscarlos en la documentación.
- ✚ Espera activa hasta el inicio de la captura de las señales. Con el fin de mantener el contexto del registro el software estará capturando datos y guardándolos en una pila FIFO (por lo tanto, de tamaño constante a modo de mediciones previas al disparo de freno o aflojamiento).

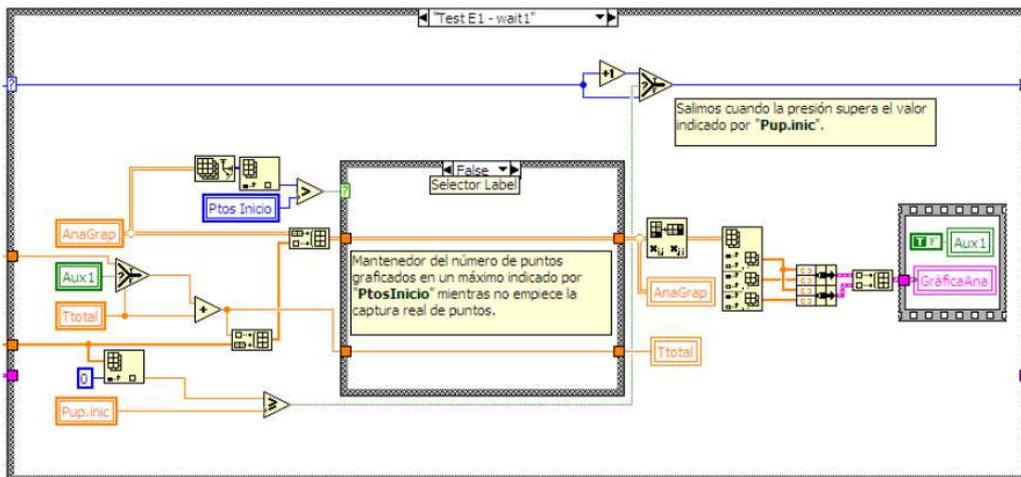


Ilustración 14. Espera activa y disparo freno de emergencia.

- ✚ Detección del punto de disparo de inicio de captura. Con el fin de liberar al usuario de tener que estar indicando a la aplicación en qué momento tienen que empezar a registrar datos, la aplicación estará comprobando la variación de la variable de presión en cilindros. Cuando detecte una variación significativa en el valor de la misma comenzará el registro correspondiente.
- ✚ Cada vez que se termina una de las fases se hace un volcado de los datos asociados a esa fase a su registro.

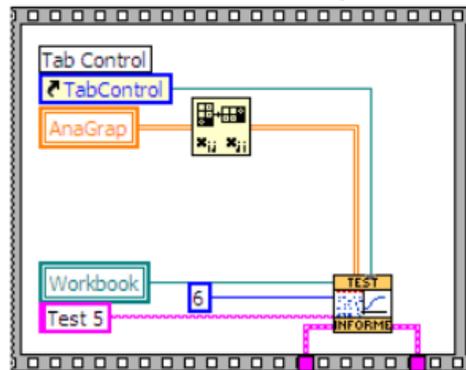


Ilustración 15. Volcado de fase.

- Además, cuando se finaliza la prueba completa se genera una nueva entrada a la BBDD general a modo de resumen de pruebas realizadas.

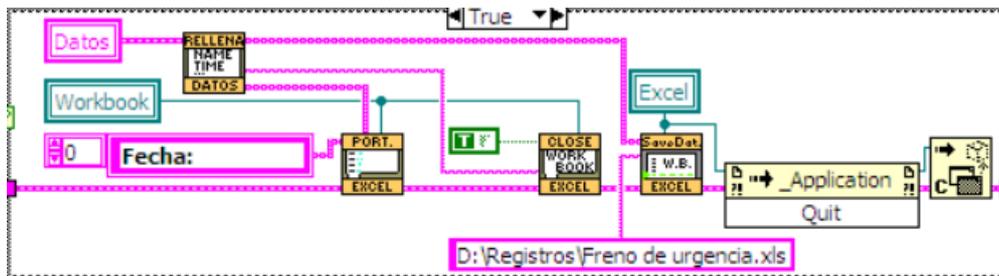


Ilustración 16. Registro en BBDD freno de emergencia.

Finalmente, **el tercer bloque** es el encargado de gestionar los posibles errores que puedan generarse durante el funcionamiento del proceso y el cierre de la aplicación.

Los posibles errores contemplados son:

- Falta de la BBDD de configuración de paneles.
- Defectos en los parámetros introducidos por el usuario.
- Errores de comunicación con el convertidor A/D.
- Otros errores.

La aplicación se adaptará a los errores localizados garantizando que solo se guardarán datos sin pérdida/corrupción de la información registrada.

4.9. Interfase de usuario para el freno de emergencia.

Uno de los objetivos del presente trabajo ha sido facilitar el manejo de la nueva solución que aquí se presenta. Para ello el punto básico es el diseño de la interfase de la aplicación que aquí pasamos a detallar.

Se han estructurado las pantallas siguiendo el proceso lógico de las pruebas. De este modo, en primer lugar, el usuario se encontrará con una pantalla para la introducción de datos de contextualización de la prueba cuyo aspecto será similar al de la Ilustración 17. Parámetros contextualización.

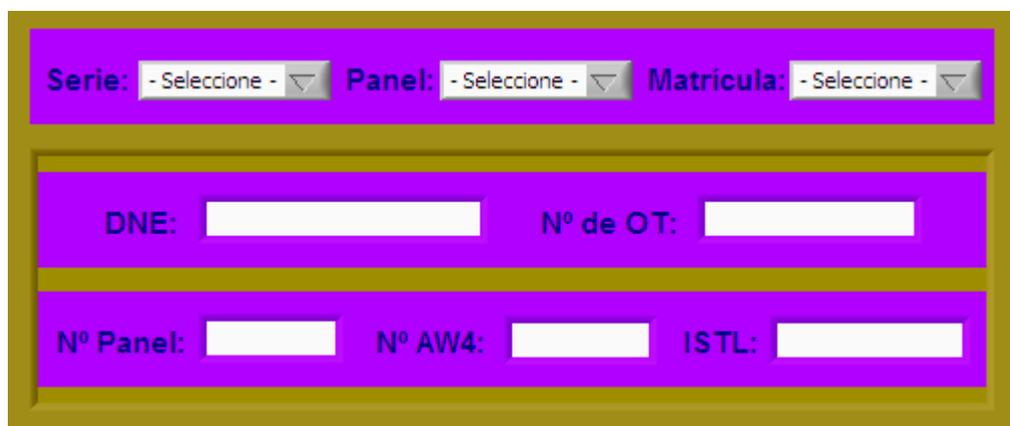


Ilustración 17. Parámetros contextualización.

Con el fin de minimizar los errores a la hora de introducir estos datos, se han incorporado selectores desplegables en aquellos campos que definen el material móvil al que pertenece el panel (serie, panel y matrícula). Ha estos selectores se les informa de las posibilidades que hay en la BBDD de configuración de forma que solo se muestre al usuario los valores aceptables.

Con el objetivo de eliminar errores humanos se comprueba, antes de pasar a la siguiente fase, la coherencia entre estos parámetros y la referencia del fabricante (ISTL) introducida por el usuario.

Además, en caso de omitirse algún parámetro la aplicación lo indicará e impedirá acceder a la realización de la prueba mientras no sean introducidos todos los datos del formulario.

Destacar en este punto que la aplicación incluye, aunque no esté visible de cara al usuario habitual, una entrada con la cual permite visualizar dos controles más. Está pensado para procesos de depuración del software y para la verificación del sistema de captación. Con esos

dos controles estaremos controlando las salidas analógicas del conversor A/D y redirigiendo los canales de entrada analógicas a otros dos del convertidor.

El siguiente paso lógico es comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Esto implica:

- Verificar la conexión con el convertidor analógico/digital. Si el PC no detecta al convertidor analógico digital no mostrará al usuario el control de avance y en su lugar se mostrará el mensaje de falta de conexión que se puede apreciar en la Ilustración 18. Sin conexión PC-A/D. La situación se normalizará automáticamente cuando se establezca la comunicación entre ambos dispositivos de forma que no sea necesario reiniciar el sistema.



Ilustración 18. Sin conexión PC-A/D.

- Verificar el funcionamiento de los transductores de presión. Llegados a este punto el usuario podrá comprobar la correcta lectura de las presiones. Para ello se dispone, en el lado derecho de la pantalla, de dos visores circulares a modo de manómetros. Con estos dos visores podrá comparar con las presiones que reflejan los correspondientes manómetros del banco de pruebas.

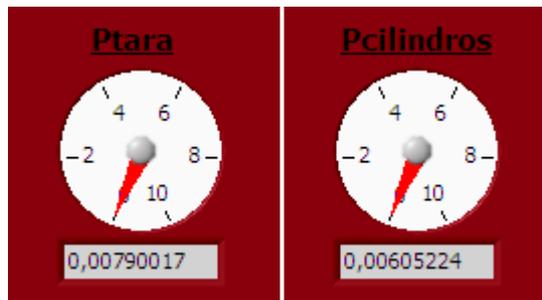


Ilustración 19. Visores de las presiones.

Una vez que tenemos comprobado el sistema, la aplicación nos mostrará la pantalla principal. Esta pantalla es la más importante dado que es en ella donde se interactuará con el panel y se registra su comportamiento. El aspecto de la aplicación, en este punto, será el que se puede apreciar en la Ilustración 20. Pantalla de Test.

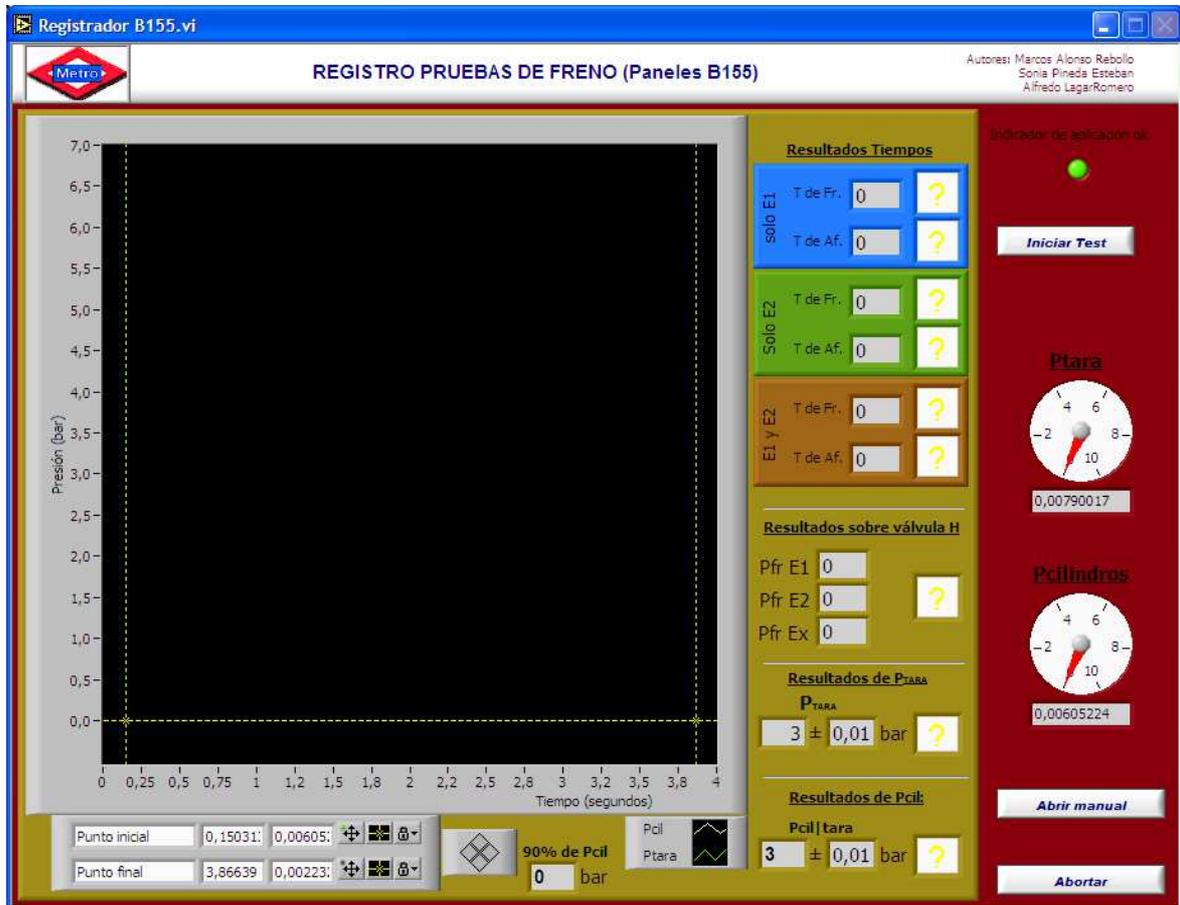


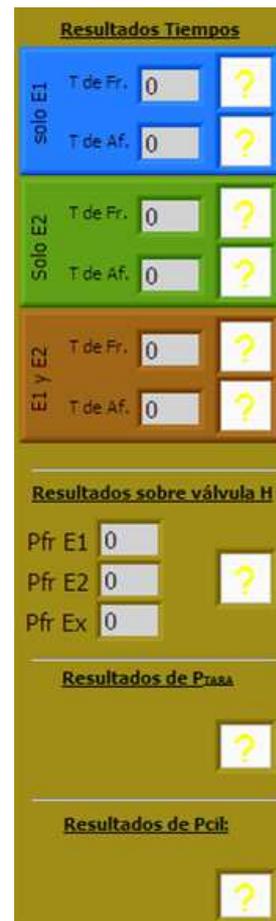
Ilustración 20. Pantalla de Test.

En ella nos encontramos los siguientes elementos:

- ✚ Inicio de Test . Con este botón el usuario de la aplicación podrá controlar el inicio de la prueba y validar los resultados de cada una de sus fases.
- ✚ Información . Este botón permite al usuario acceder a más información referente al protocolo a seguir para validar los resultados. Está pensado como un acceso rápido a la información de criterios de validación y manejo de la aplicación.
- ✚ Abortar . Con este botón podemos cancelar (con o sin registro de datos) la prueba que se está ejecutando.

- + Información sobre las mediciones que se vayan realizando. Dispondremos de una serie de indicadores numéricos que se irán rellenando a medida que se vaya realizando la prueba. Además, para facilitar la inspección visual de los resultados, se han incorporado unos indicadores visuales que nos informan directamente de si el valor medido está dentro de parámetros o no. Pueden tomar los siguientes aspectos:

- o  Con esta imagen se refleja que aún no se ha realizado la correspondiente prueba.
- o  Con esta otra imagen se indicará que la prueba se ha realizado y el resultado es satisfactorio.
- o  Con esta tercera imagen se señalizan aquellas pruebas que se han realizado pero cuyos valores están fuera de los valores admisibles.



The screenshot shows a digital interface with several sections:

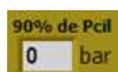
- Resultados Tiempos:** A table with three rows (Solo E1, Solo E2, E1 y E2) and two columns (T de Fr., T de Af.). Each cell contains the number '0' and a question mark icon.
- Resultados sobre válvula H:** A table with three rows (Pfr E1, Pfr E2, Pfr Ex) and two columns. Pfr E1 and Pfr Ex contain '0', while Pfr E2 contains '0' and a question mark icon.
- Resultados de P_{TARA}:** A single cell containing '0' and a question mark icon.
- Resultados de P_{cil}:** A single cell containing '0' and a question mark icon.

- + Información sobre los parámetros de la prueba. En estos visores se reflejará los parámetros de presiones que corresponden al panel indicado por el usuario. De este modo el usuario no tendrá que ir a buscar los valores de prueba.



Ilustración 21. Visores de parametrización.

- + Para el caso de los procesos de freno se calcula y muestra al usuario el valor de referencia a partir del cual se calcula el tiempo.



- + Por último, tenemos el área de grafitado presión-tiempo. En él, el usuario podrá visualizar la evolución de la presión a lo largo del tiempo durante los procesos de frenado y aflojamiento.

En esta gráfica (cuyo aspecto será similar al de la Ilustración 22. Informe parcial de freno E1.) el usuario tendrá que colocar los cursores. Uno en la posición inicial del disparo (cuando la presión empieza a subir o bajar en función del tipo de ensayo) y el segundo cuando llega a la presión objetivo.

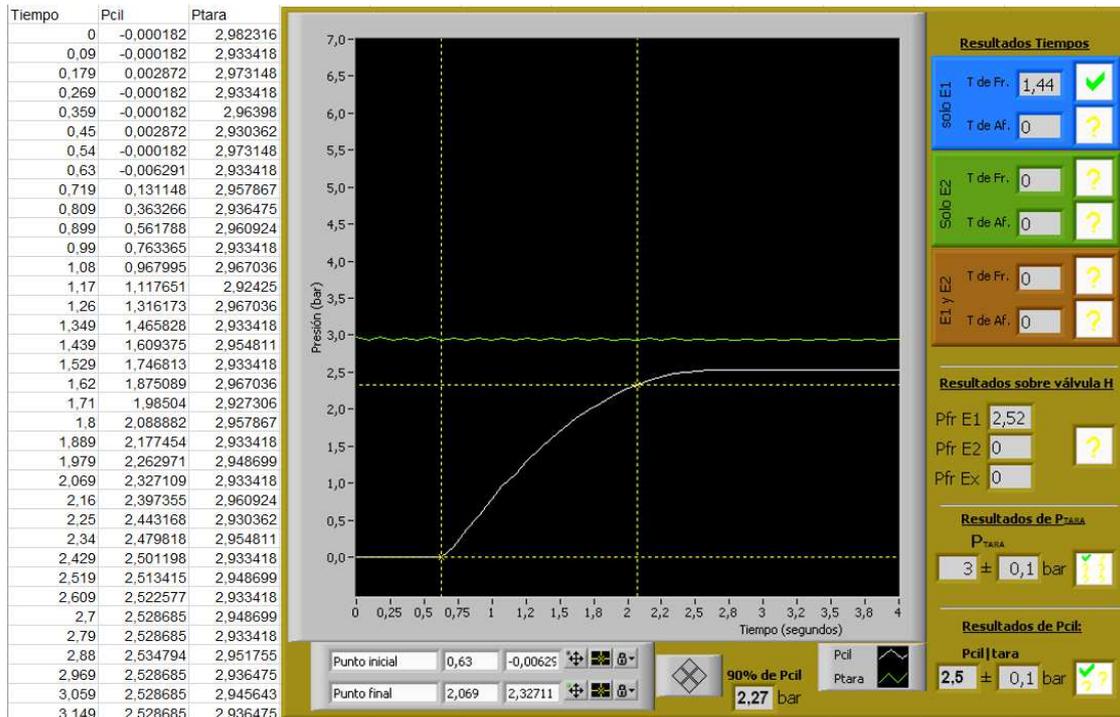


Ilustración 22. Informe parcial de freno E1.

Automáticamente, a lo largo de la prueba, la aplicación irá rellenando todas las casillas de acuerdo a la información transmitida por el usuario (posición de los cursores) y los valores de referencia del panel.

Una vez que se han completado las seis fases de la prueba, o si se solicita abortar con guardado de datos, la aplicación procederá a guardar todos los datos, pero antes mostrará una pantalla como la de la Ilustración 23. Observaciones específicas. para que el usuario pueda añadir aquella información adicional que considere necesario anexar al informe final.

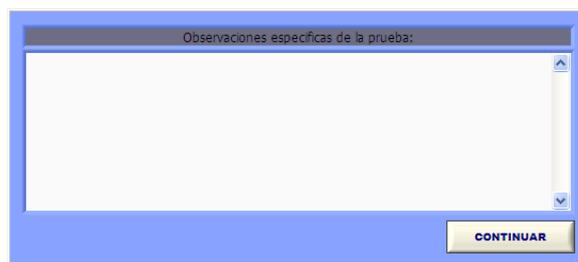


Ilustración 23. Observaciones específicas.

En resumen, el proceso de realizar la prueba del freno de emergencia queda, de cara al usuario, reducido a:

- ✚ Introducir los parámetros de contextualización.
- ✚ Generar la excitación/desexcitación de las electroválvulas de emergencia.
- ✚ Colocar los cursores en los puntos adecuados (punto previo al disparo y punto posterior a alcanzar la presión objetivo) de la gráfica.
- ✚ Verificar que la gráfica no hace trazos raros.
- ✚ Indicar a la aplicación el paso a la siguiente fase.
- ✚ Añadir los comentarios que se consideren de interés.

4.10. Desarrollo de la aplicación para el freno de servicio.

La aplicación a desarrollar para verificar el correcto funcionamiento de la válvula AW4, ha de cumplir con todos los requisitos técnicos establecidos previamente. Al igual que su homóloga para el freno de emergencia, ha sido desarrollada en LabVIEW y su código está estructurado pensando en la facilidad de comprensión por parte de los programadores y, obviamente, en la estabilidad y robustez de la misma.

Dado que, para la prueba de la AW4 no se requiere ningún parámetro de configuración, su estructura se ha podido simplificar, de forma que solo ha sido necesario un bloque funcional compuesto por:

1. Código de lectura del convertor A/D.
2. Máquina de estados.
3. Control de errores.

El código de lectura del conversor A/D tienen como misión realizar la captura de las dos señales de presión y el tiempo de captura.

Con fines depurativos incorpora los elementos necesarios para simular una prueba real. Si bien por razones obvias esta entrada está capada de cara al usuario final.

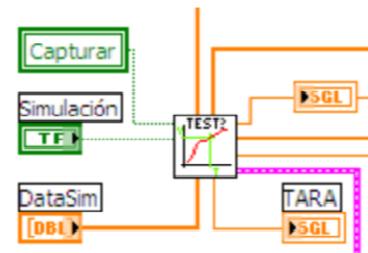


Ilustración 24. Lectura A/D.

Por su parte, la máquina de estados incorpora como características más relevantes las siguientes:

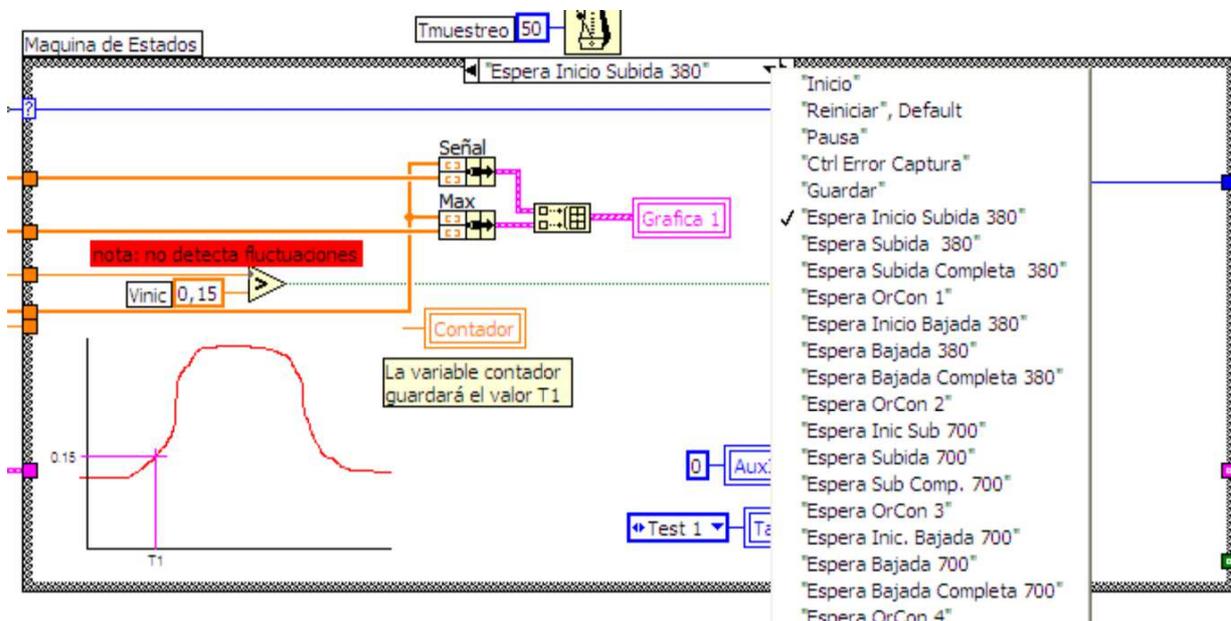


Ilustración 25. Máquina de estados AW4.

- ✚ Inicialización de controles de la aplicación.
- ✚ Petición de los datos de contexto de la prueba. Se solicitará la información necesaria (referencia del AW4, usuarios, ...) para contextualizar la prueba. Esta información formará parte del registro final.
- ✚ Espera activa hasta el inicio de la captura de las señales. Con el fin de mantener el contexto del registro el software estará capturando datos y guardándolos en una pila FIFO (por lo tanto, de tamaño constante a modo de mediciones previas al disparo de freno o aflojamiento).

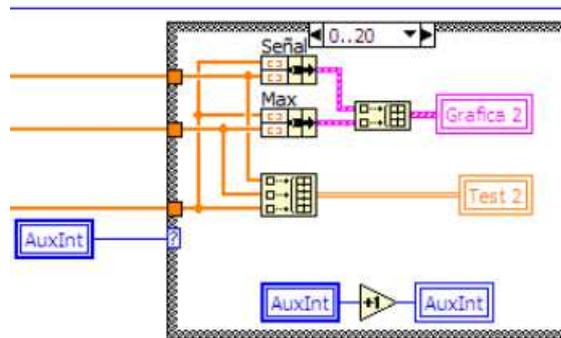


Ilustración 26. Espera activa AW4.

- 
 Detección del punto de disparo de inicio de captura. Con el fin de liberar al usuario de tener que estar indicando a la aplicación en qué momento tiene que empezar a registrar datos, la aplicación estará comprobando la variación de la variable de presión en cilindros. Cuando detecte una variación significativa en el valor de la misma comenzará el registro correspondiente.
- 
 Guardado de registros. Cuando se finaliza la prueba completa se genera una nueva entrada a la BBDD general a modo de resumen de pruebas realizadas y se rellena la ficha particular de la prueba.

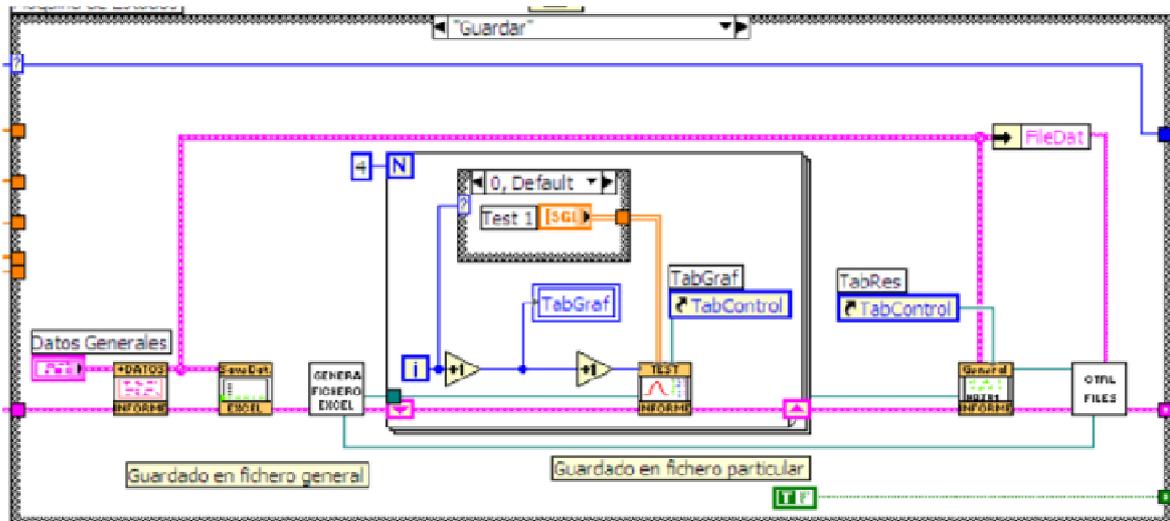


Ilustración 27. Registro en BBDD de prueba AW4.

Finalmente, el control de errores supervisará que en todo momento se está en comunicación con el convertidor analógico digital. Si esta comunicación se interrumpiera se pararía la prueba, impidiendo guardar los datos registrados hasta el momento.

4.11. *Interfase de usuario para el freno de servicio.*

Con la premisa básica de facilitar el manejo de la nueva solución se ha desarrollado la interfase que verá el usuario para la prueba del freno de servicio (AW4) que iremos desgranando a lo largo de este apartado.

Como estaba previsto, se ha desarrollado un interfase sencilla e intuitiva, en la misma línea del desarrollado para el freno de emergencia.

El primer punto será, obviamente, solicitar al usuario los datos para contextualizar la prueba, cuyo aspecto será similar al de la Ilustración 28. Parámetros prueba de servicio.

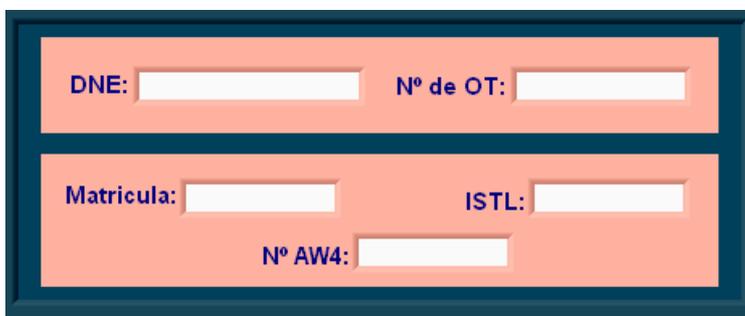


Ilustración 28 muestra una interfaz de usuario con un fondo naranja y un borde azul oscuro. Hay cinco campos de entrada de texto con etiquetas azules: 'DNE:' y 'Nº de OT:' en la fila superior; 'Matricula:' y 'ISTL:' en la fila inferior izquierda; y 'Nº AW4:' en la fila inferior central.

Ilustración 28. Parámetros prueba de servicio

Con estos datos queda trazado la válvula que se prueba y quién y cuándo se prueba. Nótese que en este caso la aplicación no requiere de una BBDD de configuración. Esto es debido a que, como se ha explicado previamente, para la prueba de la AW4 no hay ninguna diferencia en función del destino de la AW4.

Después de la introducción de los datos de contexto, el proceso lógico nos lleva a comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Es decir:

- ✓ Verificar la conexión con el convertidor analógico/digital. Si el PC no detecta al convertidor analógico digital no mostrará al usuario el control de avance, y en su lugar se mostrará el mensaje de falta de conexión que se puede apreciar en la Ilustración 18. Sin conexión PC-A/D. La situación se normalizará automáticamente cuando se establezca la comunicación entre ambos dispositivos.
- ✓ Verificar el funcionamiento de los transductores de presión. Llegados a este punto el usuario podrá comprobar la correcta lectura de las presiones. Para ello se dispone, en el lado superior izquierdo de la pantalla, de dos visores a modo de manómetros. Con estos dos visores se podrá comparar con las presiones que reflejan los correspondientes manómetros del banco de pruebas.

TARA (M1)	<input type="text" value="0"/>
Cv (M2)	<input type="text" value="0"/>

Ilustración 29. Visores AW4

Una vez que tenemos comprobado el sistema, la aplicación nos mostrará la pantalla principal. Al igual que ocurría con la aplicación para la prueba del freno de emergencia, es la pantalla más importante dado que es en ella donde se interactuará con el usuario y se registra el comportamiento de la AW4. El aspecto de la aplicación, en este punto, será el que se puede apreciar en la Ilustración 30. Pantalla de pruebas AW4.

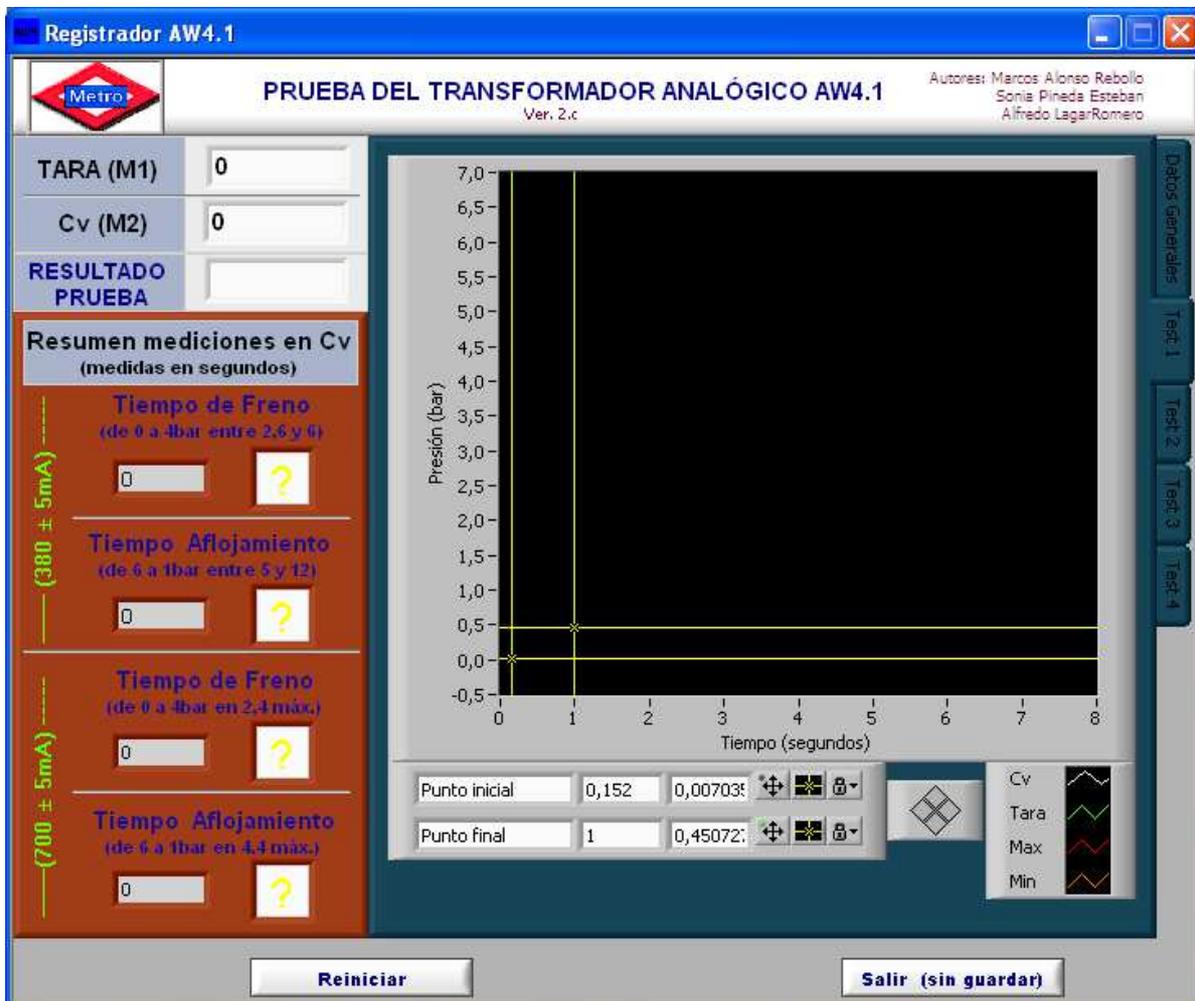


Ilustración 30. Pantalla de pruebas AW4.

En ella nos encontramos los siguientes elementos:

- Información sobre las mediciones que se estén realizando. Dispondremos de una serie de indicadores numéricos que se irán rellenando a medida que se vaya realizando la prueba. Además, para facilitar la inspección visual de los resultados, se han incorporado unos indicadores visuales que nos informan directamente de si el valor medido está dentro de parámetros o no. Pueden tomar los siguientes aspectos:

- o  Con esta imagen se refleja que aún no se ha realizado la correspondiente prueba.
- o  Con esta otra imagen se indicará que la prueba se ha realizado y el resultado es satisfactorio.
- o  Con esta tercera imagen se señalizan aquellas pruebas que se han realizado pero cuyos valores están fuera de los valores admisibles.



Ilustración 31. Visores AW4.

- Reinicio . Con este botón el usuario de la aplicación podrá cancelar la prueba para volver a repetirla. Está pensado para permitir ajustes durante el proceso de prueba.
- Abortar . Con este botón podemos cancelar la prueba que se está ejecutando y cerrar la aplicación.
- Área de ploteo de las señales. En esta gráfica (cuyo aspecto será similar al de la Ilustración 32. Informe parcial de freno AW4.) el usuario tendrá que colocar los cursores. Uno en la posición inicial del disparo (cuando la presión empieza a subir o bajar en función del tipo de ensayo) y el segundo cuando se supera la presión objetivo.

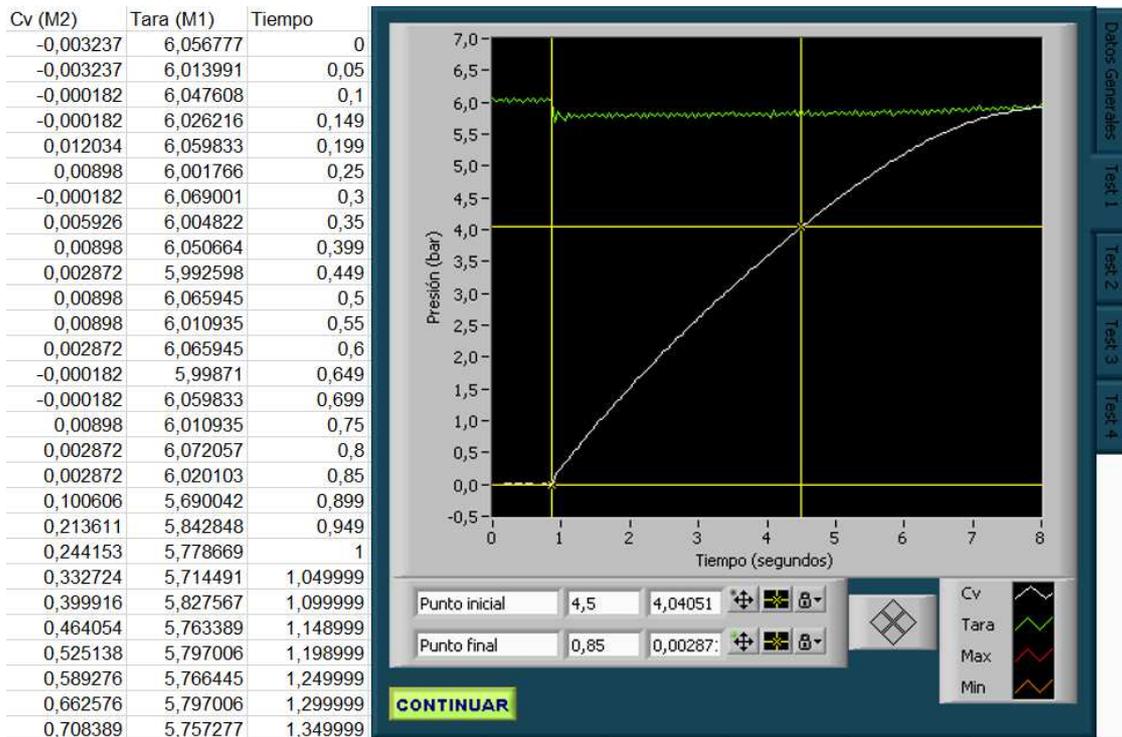


Ilustración 32. Informe parcial de freno AW4.

Cuando la aplicación haya realizado la captura de los datos (está establecido un tiempo concreto de captura previo al disparo y otro posterior) permitirá al usuario continuar a la siguiente fase. Esta acción tiene las siguientes implicaciones:

- ✓ Si el usuario continúa estará validando el tiempo medido entre los cursores posicionados por el mismo.
- ✓ La aplicación reflejará el tiempo entre cursores en el correspondiente visor numérico.
- ✓ La aplicación refrescará el indicador visual de bien/mal de acuerdo al tiempo y a los rangos establecidos.
- ✓ La aplicación le recuerda al usuario el ajuste de la fuente de alimentación (380 o 700mA) mediante un mensaje emergente en pantalla como el de la Ilustración 33. Solicitud de ajuste.

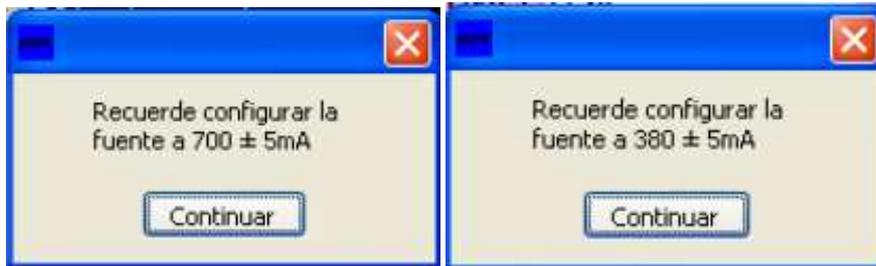


Ilustración 33. Solicitud de ajuste.

Una vez que se han completado las cuatro fases de la prueba, la aplicación procederá a guardar todos los datos, pero antes mostrará una pantalla como la de la Ilustración 34. Observaciones específicas AW4. para que el usuario pueda añadir información adicional que considere necesaria anexar al informe final.



Ilustración 34. Observaciones específicas AW4.

En resumen, el proceso de realizar la prueba del freno de emergencia queda, de cara al usuario, reducido a:

- ✚ Introducir los parámetros de contextualización.
- ✚ Generar la excitación/desexcitación de las electroválvulas de la AW4.
- ✚ Colocar los cursores en los puntos adecuados (punto previo al disparo y punto posterior a alcanzar la presión objetivo) de la gráfica.
- ✚ Verificar que la gráfica no presenta trazos extraños.
- ✚ Indicar a la aplicación el paso a la siguiente fase.
- ✚ Añadir los comentarios que se consideren de interés.

4.12. BBDD de resultados.

En ambas aplicaciones, dado que estamos manejando sistemas de freno y así lo exige el fabricante, resulta imprescindible que los resultados queden guardados como garantía del correcto funcionamiento.

En esa línea se está generando una BBDD de las pruebas realizadas. La estructura es la que a continuación pasamos a detallar.

Un fichero general para las pruebas de freno de emergencia que permite, de forma rápida, localizar una prueba concreta. En esta base de datos se incluyen los campos referentes al contexto de la prueba y por tanto es una fila dentro del fichero.

Fichero de resultados	DNE	OT	ISTL	Nº Panel	Nº AW4	Serie	Panel	Matricula
D:\Registros\Freno de urgencia\8000L1_B155S216_17704-4982		5598549	II68195/C	163	8183	8000L1	B155S2	B11709
D:\Registros\Freno de urgencia\9000_B155R102_0_3521-18080		5598720	II56231	102	853	9000	B155R	Z90020
D:\Registros\Freno de urgencia\9000_B155M188_0_4354-17704		5598719	II56251	188	809	9000	B155M	Z90019
D:\Registros\Freno de urgencia\3000_B155R1127_4389-5518		5601247	II56045	127	23	3000	B155R1	C32102
D:\Registros\Freno de urgencia\3000_B155M126_0_2092-2095		5601245	II56043	126	1018	3000	B155M	C32101
D:\Registros\Freno de urgencia\3000_B155M209_0_4997-5515		5601246	II56043	209	1017	3000	B155M	C32101
D:\Registros\Freno de urgencia\3000_B155R2157_19800-19805		5601248	II56045	157	1016	3000	B155R2	C32126
D:\Registros\Freno de urgencia\3000_B155S120_0_15927-17697		5601250	II56047	120	1019	3000	B155S	C32103
D:\Registros\Freno de urgencia\3000_B155S205_0_5512-18080		5601249	II56047	205	24	3000	B155S	C32103
D:\Registros\Freno de urgencia\8000_B155MI (3C) 4354-17704		5601497	15859	108	86	8000	B155MI (3C)	283501
D:\Registros\Freno de urgencia\8000L1_B155R216_5512-18080		5599473	II68195/B	165	8186	8000L1	B155R2	B11708
D:\Registros\Freno de urgencia\8000L1_B155M169_19800-19805		5598547	II68195/A	169	8187	8000L1	B155M	B11707
D:\Registros\Freno de urgencia\9000_B155M102_2_4389-2912		5596549	II56251	102	859	9000	B155M	Z90019
D:\Registros\Freno de urgencia\9000_B155R161_0_5515-2556		5600979	II56231	161	876	9000	B155R	Z90020
D:\Registros\Freno de urgencia\9000_B155M194_0_2526-17697		5600977	II56251	194	1020	9000	B155M	Z90019
D:\Registros\Freno de urgencia\7000_B155S173_1_5518-4354		5602449	15867	173	549	7000	B155S	273501
D:\Registros\Freno de urgencia\7000_B155S172_1_19800-19805		5602451	15867	172	251	7000	B155S	273501
D:\Registros\Freno de urgencia\9000_B155M124_1_15883-2526		55601147	II56251	124	1021	9000	B155M	Z90019
D:\Registros\Freno de urgencia\7000_B155R161_2_19872-19833		5602452	15869	161	544	7000	B155R	273502

Ilustración 35. Vista de la BBDD general del freno de emergencia.

Se genera, en segundo lugar, una ficha específica para cada prueba realizada. En esta se incorporan:

- Todos los datos de contextualización de la prueba.
- Todos los datos en bruto de las mediciones realizadas asociadas a las diversas pruebas.
- Una imagen por cada gráfica que el usuario valido.

Para que se comprenda que información es guardada, se incluye la Ilustración 22. Informe parcial de freno E1. y la Ilustración 36. Informe parcial de aflojamiento E1 y E2.

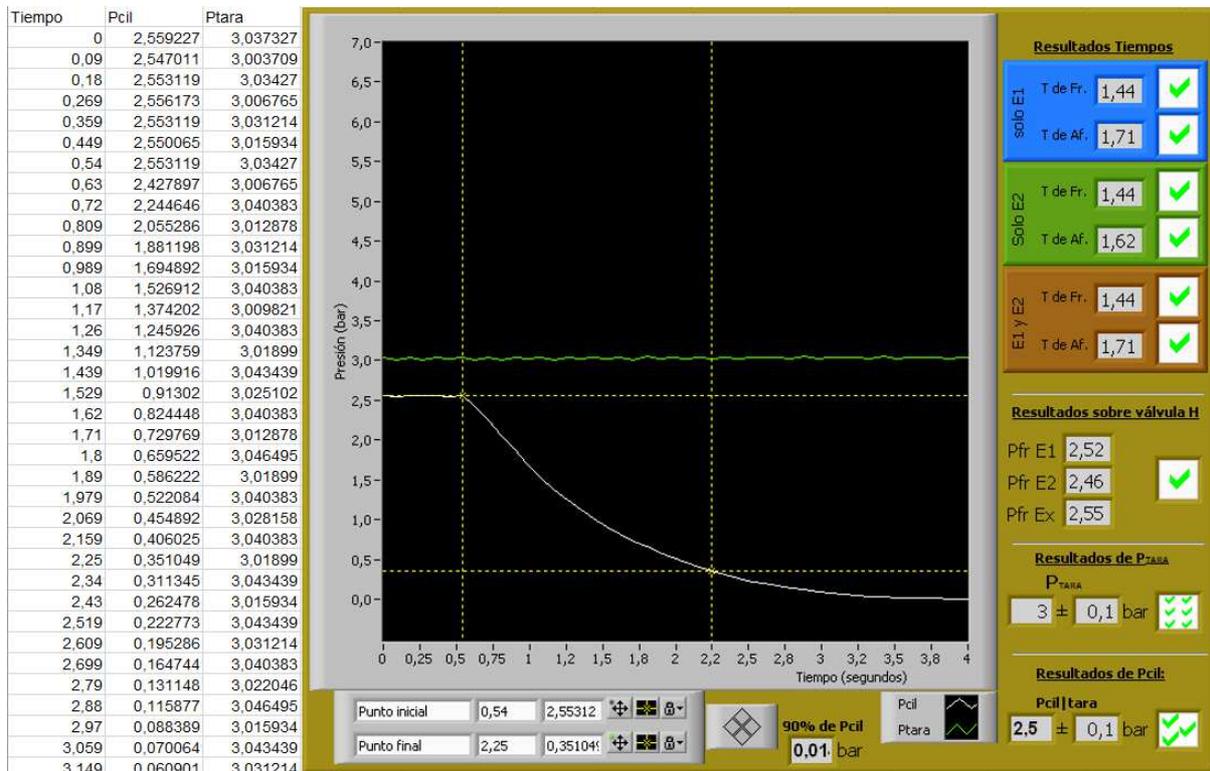


Ilustración 36. Informe parcial de aflojamiento E1 y E2.

De igual manera, se ha procedido a registrar la información de la prueba de la AW4 (freno de servicio). Es decir, tendremos un fichero donde se irán registrando todas las pruebas realizadas cuyo aspecto será como el de la Ilustración 37. Vista de la BBDD general del AW4.

Fecha	Hora	Fichero	DNEs	OT	ISTL	Matricula	NºSerie
05/03/2020	7:58:02	D:\Registros\Transformador AW4\C32126_1016_05_03_20_07_58_02.xls	19800-19805	5601248	15846	C32126	1016
05/03/2020	8:05:47	D:\Registros\Transformador AW4\C32101_1017_05_03_20_08_05_47.xls	4997-5515	5601246	15846	C32101	1017
05/03/2020	8:20:24	D:\Registros\Transformador AW4\C32101_1018_05_03_20_08_20_24.xls	2092-2095	5601245	15846	C32101	1018
05/03/2020	8:28:27	D:\Registros\Transformador AW4\C32102_0023_05_03_20_08_28_27.xls	4389-5518	5601247	15846	C32102	23
05/03/2020	8:33:57	D:\Registros\Transformador AW4\C32103_0024_05_03_20_08_33_57.xls	5512	5601249	15846	C32103	24
05/03/2020	8:42:37	D:\Registros\Transformador AW4\283501_086_05_03_20_08_42_37.xls	4354-17704	5601497	15846	283501	86
05/03/2020	8:53:53	D:\Registros\Transformador AW4\C32103_1019_05_03_20_08_53_53.xls	15927-17697	5601250	15846	C32103	1019
12/03/2020	8:02:17	D:\Registros\Transformador AW4\B11708_8186_12_03_20_08_02_16.xls	5512-18080	5599473	47665	B11708	8186
12/03/2020	8:08:58	D:\Registros\Transformador AW4\Z90019_855_12_03_20_08_08_58.xls	4389-2512	5596549	15846	Z90019	855
12/03/2020	8:22:08	D:\Registros\Transformador AW4\B11707_8187_12_03_20_08_22_08.xls	19800-19805	5598547	47665	B11707	8187
16/04/2020	11:33:38	D:\Registros\Transformador AW4\189127_848_16_04_20_11_33_37.xls	4982	5603294	15846	189127	848
16/04/2020	11:44:49	D:\Registros\Transformador AW4\Z90019_1020_16_04_20_11_44_49.xls	2526-17697	5600977	15846	Z90019	1020
16/04/2020	11:54:09	D:\Registros\Transformador AW4\189127_042_16_04_20_11_54_09.xls	15991	5603095	15846	189127	42
04/05/2020	7:54:34	D:\Registros\Transformador AW4\Z90020_876_04_05_20_07_54_34.xls	5515-2556	5600979	15846	Z90020	876
13/05/2020	7:39:57	D:\Registros\Transformador AW4\Z73501_251_13_05_20_07_39_57.xls	19800-19805	5602451	15846	273501	251
13/05/2020	7:56:13	D:\Registros\Transformador AW4\Z73501_549_13_05_20_07_56_13.xls	5518-4354	5602449	15846	273501	549
13/05/2020	8:02:40	D:\Registros\Transformador AW4\Z90026_706_13_05_20_08_02_40.xls	4982	5600998	145846	Z90026	706
13/05/2020	8:11:14	D:\Registros\Transformador AW4\283503_080_13_05_20_08_11_14.xls	2550-5477	5601498	15846	283503	80
13/05/2020	8:25:33	D:\Registros\Transformador AW4\z90019_759_13_05_20_08_25_33.xls	5518-16516	5601148	15846	z90019	759
13/05/2020	8:35:58	D:\Registros\Transformador AW4\Z73502_544_13_05_20_08_35_58.xls	17822-19833	5602452	15846	273502	544
13/05/2020	8:45:25	D:\Registros\Transformador AW4\Z90019_1021_13_05_20_08_45_25.xls	2526-15833	5601147	15846	Z90019	1021
13/05/2020	8:53:06	D:\Registros\Transformador AW4\B11707_8188_13_05_20_08_53_06.xls	2512-2531	5604458	47665	B11707	8188
22/05/2020	8:49:12	D:\Registros\Transformador AW4\B11708_8189_22_05_20_08_49_12.xls	19800-19805	5604200	47665	B11708	8189
22/05/2020	8:59:25	D:\Registros\Transformador AW4\B11709_8190_22_05_20_08_59_25.xls	15883-2526	5604201	47665	B11709	8190
22/05/2020	9:16:33	D:\Registros\Transformador AW4\Z90020_710_22_05_20_09_16_33.xls	17697/15927	5601149	15846	Z90020	710
22/05/2020	10:19:28	D:\Registros\Transformador AW4\Z90020_707_22_05_20_10_19_28.xls	18080	5605207	15846	Z90020	707

Ilustración 37. Vista de la BBDD general del AW4.

Y una ficha para cada prueba específica con toda la información recogida como se muestra en la Ilustración 32. Informe parcial de freno AW4. y en la Ilustración 38. Informe parcial de aflojamiento AW4.

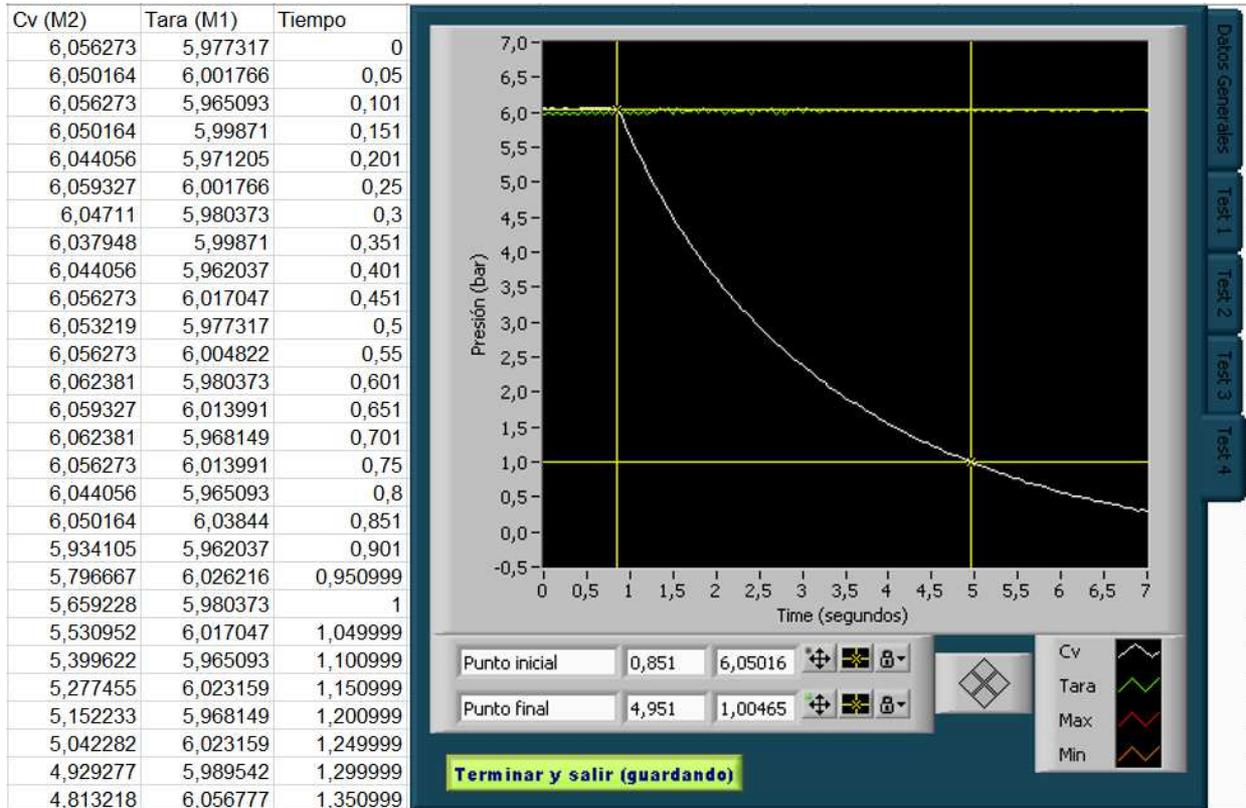


Ilustración 38. Informe parcial de aflojamiento AW4.

4.13. Integración hardware-software.

Una vez que el hardware ha sido montado (como se ha descrito en el punto 4.6 Montaje del hardware.) y las aplicaciones desarrolladas (descrito el proceso entre los puntos 4.8 y 4.11), se hace necesario comprobar:

- Correcto entendimiento entre hardware y software. De modo que lo que realmente están transmitiendo los transductores sea lo que el usuario está leyendo en la pantalla.
- Coherencia de las mediciones. Es decir que lo que estamos midiendo con nuestro diseño sea realmente lo que está pasando en la realidad.
- Repetitividad de las pruebas. Si repetimos una prueba con las mismas condiciones de contorno los resultados han de ser los mismos.

El primer punto exige el empleo de un polímetro. De forma que, mientras voy variando la presión de entrada del transductor (voy barriendo su curva de comportamiento que está representada en la Ilustración 9. Curva de transductor.), con el polímetro leo la señal de tensión producida por el transductor (en el bornero del convertidor A/D) y en la pantalla de las aplicaciones compruebo la coherencia entre ambos datos (Tensión de salida del transductor- Presión leída en la pantalla).

El siguiente punto de la integración se consigue mediante el uso de un par de manómetros externos. Si conectamos los manómetros a los mismos puntos de medida que nuestros transductores podremos comparar las lecturas de los manómetros con las de los visores de las aplicaciones.

Este proceso será similar al que se implementará para la realización de las calibraciones periódicas del sistema. Con la diferencia de que no se conectarán manómetros externos si no que se forzará una presión consigna controlada.

Además se realiza, para este mismo punto de la integración, sobre tres paneles diferentes y sus correspondientes AW4 la prueba con el sistema antiguo y simultáneamente con la solución desarrollada.

La conclusión es, como no podía ser de otro modo, que el sistema de adquisición mide correctamente y la aplicación presenta la información de forma inmediata y fidedigna.

Finalmente, el tercer punto de la integración consistirá en realizar la misma prueba en varias ocasiones. Para garantizar la compatibilidad total se realizan cuatro pruebas independientes sobre el mismo panel sin ningún tipo de modificación entre prueba y prueba. Además, se repite la operación con tres paneles diferentes (de diferente material rodante y revisado por personas diferentes). Igualmente se realizan ensayos sobre válvulas AW4.

Todos los datos obtenidos son analizados y comparados y se constata que el sistema no presenta prácticamente ninguna desviación al repetir pruebas en las mismas condiciones.

Tras pasar las pruebas descritas en los puntos anteriores se da por correctamente integrado el sistema y se considera que está maduro para pasar a producción.

4.14. Validación del sistema completo.

El último paso, para dejar en producción la solución diseñada, es dejar el sistema en manos de los usuarios finales para que operen con ella y señalen posibles modificaciones que puedan

mejorar el sistema.

Tras una semana en planta y algunas peticiones de ayuda, el feedback transmitido ha sido:

- a- Necesidad de la información de las consistencias de las pruebas más a mano. Por este motivo se incluyó en las ventanas de las aplicaciones más información e, incluso, se añadió un enlace con información en la aplicación del freno de emergencia.
- b- Necesidad de modificar los tamaños de los números/texto. Con objeto de mejorar este aspecto ergonómico se incrementó el tamaño de las fuentes.
- c- El sistema es muy cómodo de manejar y se entiende fácilmente.

Además de los aspectos señalados, para poder validar el trabajo realizado, es necesario repasar los objetivos marcados al inicio del proyecto (y descritos en el punto 2. OBJETIVOS del presente documento). Con respecto a lo conseguido podemos señalar:

a) Incremento en la seguridad de las pruebas:

Se han establecido mecanismos de detección de errores en la introducción de los datos de contextualización por parte del usuario.

Además, las aplicaciones indican al usuario si los parámetros medidos están dentro de los márgenes correctos, evitando de ese modo los errores de cálculo.

El guardado de los resultados se realiza de forma automática. De ese modo se evitan errores humanos de clasificación y archivado.

b) Mejora del proceso productivo:

Con el producto desarrollado se ha conseguido un ahorro de tiempo, una estimación de este ahorro es el mostrado en la Tabla 2. Ahorros de tiempo.

Tabla 2. Ahorros de tiempo.

Concepto	Ahorro (minutos)	
	B155	AW4
Búsqueda documental	3	1
Cálculo de los resultados	5	4
Archivado de los registros	3	3
Total por equipo:	11	8

Realizando un análisis nivel global tenemos que los equipos reparados/revisados en los últimos años son los indicados a continuación en la Tabla 3. Revisiones anuales.

Tabla 3. Revisiones anuales.

Año	B155	AW4
2017	215	214
2018	259	256
2019	264	268
2020 (*)	116	118
Media	242,5	243,5

(*) Hasta la fecha 1/06/2020

Con estos datos, se puede estimar un ahorro, en tiempo de mano de obra directa, de 77 horas anuales.

Además, la mejora del proceso también está basada en la cooperación entre el software y el usuario, que se traduce en una mejor y más rápida información al usuario de los valores de referencia y adecuación de los resultados a los estándares.

c) Generar una BBDD:

Se está generando, como se ha descrito en el apartado 4.12. BBDD de resultados., una base de datos que recoge absolutamente toda la información generada durante la prueba. Esta base de datos facilita enormemente la búsqueda de informes concretos tanto por el formato en sí como por la eliminación de errores humanos que se producían por el archivado humano.

d) Digitalizar el proceso.

Recordemos que la digitalización, como se ha explicado en la asignatura de Sistemas de control y supervisión [11] es un proceso consistente en:

1. Captura de los datos (incluida su contextualización).
2. Almacenamiento de la información (en un formato accesible).
3. Toma de decisiones en base a esa información.

Con el proyecto puesto en funcionamiento, se ha conseguido dar cumplimiento a los dos primeros puntos del proceso de digitalización. De este modo se ha dado un primer paso que permita en el futuro (cuando la base de datos tenga los suficientes registros) realizar análisis y toma de decisiones mediante la aplicación de técnicas de aprendizaje automático.

5. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

Tras la realización del presente Trabajo Fin de Máster se ha dotado a Metro de Madrid de una nueva herramienta de trabajo que permite de manera inmediata su aplicación.

El desarrollo ha supuesto una revisión de las diversas normas que afectan a los sistemas de control electro-neumático de las diversas series de material rodante de Metro de Madrid (a excepción de los 5000), lo que ha permitido al autor tener un conocimiento mucho más profundo de estos sistemas más allá de la teoría pura del funcionamiento.

Con el sistema desarrollado se han conseguido diversas ventajas competitivas para la empresa, entre las que cabe destacar:

- ✚ Un ahorro de tiempo de mano de obra directa (estimado en 77 horas anuales) como consecuencia de informar directamente al usuario de los requerimientos, realizar los cálculos pertinentes y realizar automáticamente el archivado de la información.
- ✚ Una reducción de los errores humanos al realizar los cálculos sobre las mediciones obtenidas, contextualización de la prueba, ... de una forma automática y/o guiada.
- ✚ Un avance más en el proceso de digitalización que está implementando el TIR de Metro de Madrid, aportando en este sentido una información completa de las pruebas en formato digital. Este aspecto es clave de cara al futuro dado que supone que se genere una base de información para la aplicación de técnicas de aprendizaje automático.
- ✚ Un ahorro de mano de obra indirecta ante la necesidad puntual de justificar las actuaciones realizadas y su buen desarrollo. Este ahorro se ve multiplicado por la facilidad para encontrar una prueba concreta y por la eliminación de errores al generar la documentación.

En definitiva, este Trabajo Fin de Máster está aportando un granito de arena en la mejora de los procesos de revisión/repación de los equipos electro-neumáticos de los sistemas de freno de fricción por parte de Metro de Madrid.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Metro de Madrid. Planes de mantenimiento de las diversas series de material móvil de Metro de Madrid.

[2] Metro de Madrid. Normas Técnicas de los diversos paneles B155 de Metro de Madrid.

[3] KNORR. Normas Técnicas referidas a las pruebas de los paneles neumáticos.

[4] Principios de funcionamiento del freno en vehículos ferroviarios. KNORR-BREMSE España para UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS – ICAI / Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios.

[5] Apuntes de la asignatura de Electrificación Ferroviaria. Eduardo Pilo (2019). Máster en Sistemas Ferroviarios, ICAI-Universidad Pontificia de Comillas

[6] Apuntes de la asignatura de Gestión de la energía y de los recursos del operador. Alberto García Álvarez y José Conrado Martínez Acevedo (2020). Máster en Sistemas Ferroviarios, ICAI-Universidad Pontificia de Comillas

[7] Metro de Madrid. Normas Técnicas de las electroválvulas de emergencia.

[8] Metro de Madrid. Norma Técnica de las AW4.

[9] Documentación del fabricante “tecsis”. Manual y características del transductor P3290.

[10] Documentación del fabricante “National Instrument” www.ni.com. Manual y características del convertidor A/D “NI USB-6003”.

[10] Cursos de “National Instrument”. Cursos de LabVIEW básico y avanzado.

[11] Apuntes de la asignatura Sistemas de control y supervisión. José Antonio Rodríguez Mondéjar. Máster en Sistemas Ferroviarios, ICAI-Universidad Pontificia de Comillas.